

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET
Diplomski studij geologije

Analiza seizmičkih atributa primijenjenih u strukturnoj interpretaciji trodimenzionalnih seizmičkih podataka na primjeru naftnog polja Ježevo

Diplomski rad

Filipa Šimičević

G 209

Zagreb, 2018.

Zahvala

Veliku zahvalnost, u prvom redu, dugujem svojoj mentorici Doc. dr. sc. Jasni Orešković na ukazanom povjerenju, predloženoj temi i stručnoj pomoći pri izradi ovog diplomskog rada. Također zahvaljujem asistentici mag. ing. geol. Nataši Balaško na pomoći i korisnim savjetima prilikom interpretacije u Petrelu.

Svojoj obitelji, a posebice majci, ocu, baki Katici i teti Suzi zahvaljujem se na bezuvjetnoj podršci, strpljenju i motivaciji.

Naposljetku, zahvaljujem se svim svojim prijateljima i dragim ljudima koji su mi pružali moralnu podršku ne samo prilikom izrade diplomskog rada, nego i tijekom studiranja, hvala vam na nesebičnoj podršci i razumijevanju.

Analiza seizmičkih atributa primijenjenih u strukturnoj interpretaciji trodimenzionalnih seizmičkih podataka na primjeru naftnog polja Ježevo

FILIPA ŠIMIČEVIĆ

Diplomski rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet
Zavod za geofizička istraživanja i rudarska mjerenja
Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Sažetak

Diplomski rad izrađen je u računalnom programu PetrelTM 2014, a cilj mu je analiza primjene seizmičkih atributa u strukturno-tektonskoj interpretaciji seizmičkih podataka na polju Ježevo. U radu su interpretirana tri horizonta: krovina Gama serije pješčenjaka i horizonti koji odgovaraju elektrokarotažnim markerima Z' i Rs7. U svrhu povezivanja seizmičkih i bušotinskih podataka izrađen je sintetski seizmogram za bušotinu JE-1DU. Prilikom interpretacije polja korišteni su prostorni seizmički atributi: *trenutna amplituda*, *kosinus trenutne faze*, *varijanca* i *kaos* koji su znatno pomogli pri seizmičkoj interpretaciji. Detaljno je opisana izrada atributa praćenja tragova koji je uvelike olakšao praćenje i interpretaciju sustava rasjeda. Također, izrađeni su i virtualni seizmički volumeni uz pomoć seizmičkog kalkulatora koji su dali nove prikaze atributa varijance i kaosa s jasnije istaknutim diskontinuitetima.

Ključne riječi: Petrel 2014, sintetski seizmogram, seizmička interpretacija, volumni seizmički atributi, atribut praćenja tragova, seizmički kalkulator

Diplomski rad sadrži: 43 stranice, 28 slika, 26 referenci

Jezik izvornika: hrvatski

Diplomski rad pohranjen: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta

Voditelj: Dr. sc. Jasna Orešković, docentica

Ocjenjivači: Dr. sc. Jasna Orešković, docentica
Dr. sc. Franjo Šumanovac, redoviti profesor
Dr. sc. Davor Pavelić, redoviti profesor

Datum obrane: 14. rujna 2018.

Analysis of seismic attributes applied in the structural interpretation of three-dimensional seismic data on the example of Ježevo oil field

FILIPA ŠIMIČEVIĆ

Thesis completed at: University of Zagreb
Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering
Department of Geophysical Exploration and Mine Surveying
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Abstract

This master's thesis was made using the Petrel™ 2014 computer program. The goal of the thesis was to analyze the application of seismic attributes on structural-tectonic interpretation in Ježevo field. Three horizons were interpreted in this thesis: the top of the Gama sandstone series and horizons corresponding to E-log markers Z' and Rs7. For the purpose of connecting seismic and well data synthetic seismogram was calculated for JE-1DU well. Several volume seismic attributes were used to interpret the field: *reflection strength, cosine of instantaneous phase, variance and chaos*, which made seismic interpretation much easier. Moreover, the ant tracking attribute workflow has been elaborated which greatly facilitated the monitoring and interpretation of the fault systems. Also, virtual seismic volumes were created with the aid of a seismic calculator that gave new insights of variance and chaos attributes with a clearer emphasis on discontinuities.

Key words: Petrel 2014, synthetic seismogram, seismic interpretation, volume seismic attributes, ant tracking attribute, seismic calculator

Thesis contains: 43 pages, 28 features, 26 references

Original in: Croatian

Thesis deposited at: The Library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering

Supervisor: Assistant Professor Jasna Orešković, PhD

Reviewers: Assistant Professor Jasna Orešković, PhD
Professor Franjo Šumanovac, PhD
Professor Davor Pavelić, PhD

Date of defense: September 14th, 2018.

SADRŽAJ

1 UVOD	1
2 NAFTNO POLJE JEŽEVO	2
2.1 Geografski položaj	2
2.2 Povijest istraživanja	2
2.3 Stratigrafski odnosi	3
2.4 Geološke karakteristike ležišta	6
3 KRATKI PRIKAZ METODE 3D-SEIZMIKE.....	7
3.1 Snimanje 3D-seizmike	7
3.2 Zakoni brzina i sintetski seizmogram	9
4 INTERPRETACIJA	11
4.1 Izrada sintetskog seizmograma	12
4.2 Interpretacija seizmičkih horizonata.....	13
4.3 Strukturno-tektonska interpretacija.....	16
5 SEIZMIČKI ATRIBUTI	21
5.1 Hilbertova transformacija	22
5.2 Primjena seizmičkih atributa u interpretaciji	24
5.2.1 Trenutna amplituda.....	25
5.2.2 Kosinus trenutne faze	26
5.2.3 Varijanca.....	27
5.2.4 Kaos	29
5.2.5 Atribut praćenja tragova.....	30
5.2.6 Seizmički kalkulator	37
6 ZAKLJUČAK	42
LITERATURA.....	43

Popis slika

Slika 2.1 Geografski položaj polja Ježevo (www.google.com/earth/)	2
Slika 2.2 Stratigrafske jedinice, litološki sastav i položaj važnijih ležišta u Savskoj depresiji (VELIĆ, 2007).	5
Slika 3.2 Skica izrade sintetskog seizmograma (SHERIFF, 1978).	9
Slika 3.2 Prikaz upada P-vala na granicu dvaju sredstava različite brzine i gustoće pod kutem različitim od pravog (Snellov zakon).	11
Slika 4.1 Sintetski seizmogram za bušotinu JE-1DU s ulaznim karotažnim podacima te odabranim valićem	12
Slika 4.2 Trodimenzionalni prikaz interpretiranih horizonata	13
Slika 4.3 Odabrani profila s važnijim bušotinama na polju Ježevo	14
Slika 4.4 Uzdužni seizmički profil L_{2440}	15
Slika 4.5 Trodimenzionalni prikaz interpretiranih rasjeda	16
Slika 4.6 Poprečni seizmički profil T_{880}	17
Slika 4.7 Shematski prikaz deformacija uzrokovanih jakim horizontalnim stresom (MALVIĆ & SAFTIĆ, 2008).	18
Slika 4.8 3D-prikaz prostora zahvaćenog jakim horizontalnom tektonikom (MALVIĆ & SAFTIĆ, 2008).	19
Slika 4.9 Prikaz pozitivne i negativne cvjetne strukture (DREW, 2003).	19
Slika 4.10 Poprečni seizmički profil T_{950}	20
Slika 5.1 Grafički prikaz kompleksnog seizmičkog traga; $A(t)$ - trenutna amplituda (OREŠKOVIĆ, 2006).	23
Slika 5.2 Poprečni profil T_{950} prikazan atributom trenutne amplitude	25
Slika 5.3 Poprečni profil T_{950} prikazan atributom kosinusa trenutne faze	27
Slika 5.4 Poprečni profil T_{950} prikazan atributom varijance	28

Slika 5.5 Vremenski presjek atributa varijance za dvostruko vrijeme putovanja vala od 1684 ms.....	29
Slika 5.6 Poprečni profil T_{950} prikazan atributom kaosa.....	30
Slika 5.7 Shema tijeka izračuna atributa praćenja tragova (eng. Ant-tracking workflow).....	32
Slika 5.8 Prikaz radijusa pokrivenosti u vokselima, koji ovdje iznosi 3 (SCHLUMBERGER, 2007).....	34
Slika 5.9 3D i 2D vremenski presjek atributa praćenja tragova za dvostruko vrijeme putovanja vala od 1684 ms.....	36
Slika 5.10 3D i 2D vremenski presjek izrađenog kombiniranog volumena za dvostruko vrijeme putovanja vala od 1684 ms.....	38
Slika 5.11 Vremenski presjek izrađenog kombiniranog volumena atributa varijance za dvostruko vrijeme putovanja vala od 1684 ms.....	39
Slika 5.12 Vremenski presjek izrađenog kombiniranog volumena atributa varijance i klasičnog atributa varijance za dvostruko vrijeme putovanja vala od 1684 ms.....	39
Slika 5.13 Poprečni profil T_{950} prikazan izrađenim kombiniranim volumenom atributa varijance.....	40
Slika 5.14 Poprečni profil T_{950} prikazan izrađenim kombiniranim volumenom atributa kaosa.....	41

1 UVOD

Diplomski rad vlastita je interpretacija naftnog polja Ježevo. Za izradu ovog diplomskog rada korišteni su postojeći 3D seizmički podaci polja Ježevo. Oni potječu iz 1997. godine kada je mađarska tvrtka GES Kft iz Budimpešte izvela seizmička mjerenja u sjeverozapadnom dijelu Hrvatske.

Naftno polje Ježevo nalazi se oko 30 km istočno od Zagreba i proteže se u pravcu sjeverozapad-jugoistok između naselja Ježevo i Trebovec. Istraživanje je započelo 1955. godine otkrivanjem strukture Ježevo. Prva istražna bušotina JE-1 ukazala je na kolektore pješčane serije Gama zasićene značajnim rezervama nafte unutar naslaga donjeg panona. Na strukturi Ježevo mogu se izdvojiti dvije antiklinale: sjeverozapadna i jugoistočna. Sjeverozapadna antiklinala otkrivena je prva bušotinom JE-1 i zauzima zapadni dio polja Ježevo. Jugoistočna antiklinala otkrivena je 1979. godine bušotinom JE-10.

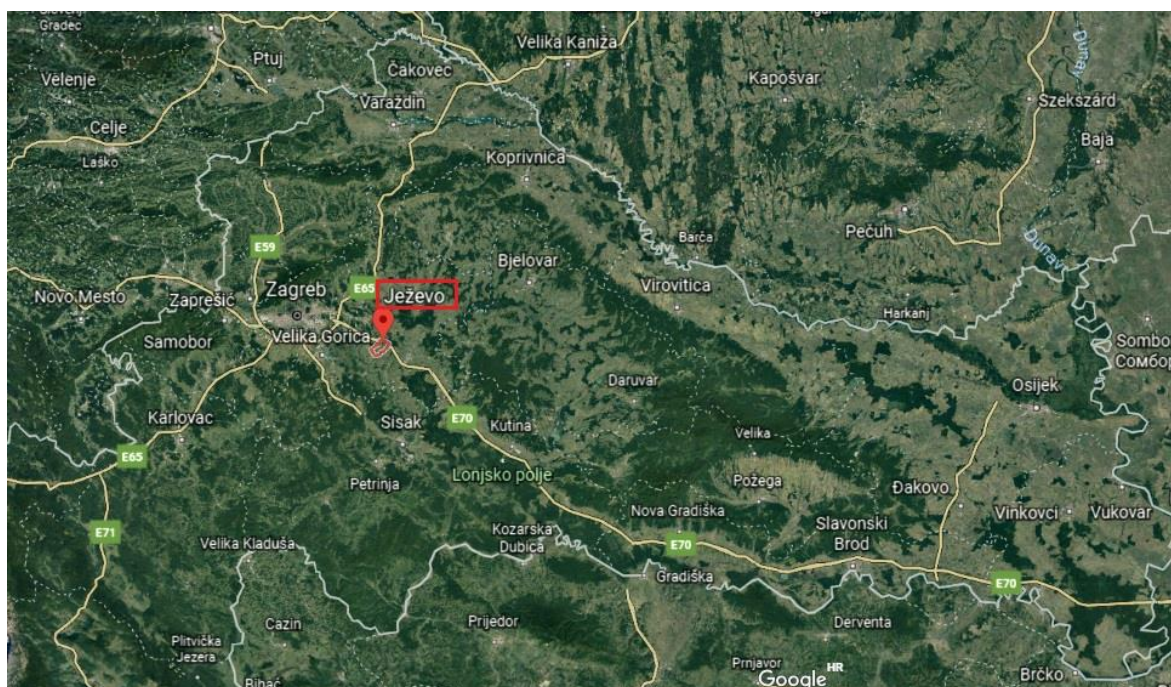
Interpretacija naftnog polja Ježevo izvedena je u programskom paketu PetrelTM 2014 tvrtke Schlumberger. Osnovni cilj ovog rada je strukturno-tektonska interpretacija na polju Ježevo uz pomoć izrade prostornih seizmičkih atributa koji daju nove mogućnosti prikaza podataka što rezultira preciznijom interpretacijom, ali također mogu upućivati i na neka nova saznanja.

Prilikom interpretacije seizmičkih horizonata i rasjeda korišteni su atributi trenutna amplituda, kosinus trenutne faze, varijanca, kaos i atribut praćenja tragova koji podrazumijeva pomno pripremljene ulazne podatke i tijek rada. Isprobano je korištenje seizmičkog kalkulatora pri čemu su dobivene nove kombinacije virtualno izračunatih seizmičkih volumena sa zanimljivim rezultatima.

2 NAFTNO POLJE JEŽEVO

2.1 Geografski položaj

Naftno polje Ježevo nalazi se oko 30 km istočno od Zagreba i oko 16 km zapadno od Ivanić Grada i pripada Zagrebačkoj županiji, općini Rugvica (slika 2.1). Proteže se u pravcu sjeverozapad-jugoistok između naselja Ježevo i Trebovec južno od autoceste Zagreb-Lipovac (LINARIĆ et al., 1986).



Slika 2.1 Geografski položaj polja Ježevo (www.google.com/earth/)

Naftno polje Ježevo skupa s poljima Ivanić, Žutica, Okoli, Šumećani, Bunjani i Kloštar pripada Ivanićkoj zoni nakupljanja ugljikovodika, dok tektonski pripada dubljem dijelu Savske depresije (VELIĆ, 1980).

2.2 Povijest istraživanja

Istražni radovi provedeni 1955. godine na polju Ježevo rezultirali su intenzivnijim seizmičkim istraživanjem dubljeg dijela Savske potoline. Slijedeće regionalno seizmičko profiliranje izvedeno je 1958. godine. Nakon toga, od 1961. godine vršena su detaljna

seizmička istraživanja i povezivanja regionalnih profila s detaljnim seizmičkim profilima. Istražna bušotina JE-1 bila je prva bušotina koja je nabušila kolektore pješćane serije Gama i time ukazala na značajne rezerve nafte unutar naslaga donjeg panona. U razdoblju od 1963.-1974. izrađeno je ukupno 15 kanala bušotina (JE-1, JE-2, JE-3, 4, 5, 5A, 6, 7, 7 alfa, 8, 8 alfa, 8 beta, 9, 9 alfa, 9 beta). Podaci dobiveni iz tih bušotina omogućili su bolji uvid u strukturne i naftnogeološke značajke polja, ali i proizvodne mogućnosti. Proizvodnja je započela 1971. godine bušotinom JE-8 (LINARIĆ et al, 1986).

Na strukturi Ježevo izdvojene su dvije antiklinale: sjeverozapadna i jugoistočna. Sjeverozapadna antiklinala otkrivena je prva bušotinom JE-1 i zauzima zapadni dio polja Ježevo. Jugoistočna antiklinala otkrivena je 1979. godine bušotinom JE-10. Polje ima formu vrlo izdužene antiklinale relativno blagih krila koja jednoliko tonu s obje strane strukture. Sjeverozapadno čelo antiklinale tone strmije dok je jugoistočno blago položeno. Osim dubine, oblik antiklinale također nije istovjetan. Struktura je šira prema sjeverozapadnom čelu antiklinale dok se prema jugoistočnom čelu potpuno suzuje (MAJER et al., 2006).

2.3 Stratigrafski odnosi

Stratigrafski odnosi dobiveni su paleontološkim analizama, na osnovi litoloških karakteristika sedimenata i korelacijom pojedinih stratigrafskih horizonata i karakterističnih repera izdvojenih i markiranih na elektrokarotaznim dijagramima što je prikazano na slici 2.2 (LINARIĆ et al., 1986). Na polju Ježevo utvrđene su sljedeće kronostratigrafske jedinice:

Miocen (M)

U bušotinama JE-1 i JE-1DU nabušena je krovina Prečec formacije. Litološki sastav naslaga u gornjem dijelu miocena sastoji se od sivih, tvrdih, laporovitih vapnenaca, sivih i tamnosivih siltoznih, vapnovitih lapora i siltoznih vapnovitih sitnozrnatih pješčenjaka. Pri većim dubinama laporoviti vapnenci prelaze u biogene vapnence koji su plinonosni i zasićeni naftom. Donji dio miocennskih naslaga izgrađuju tvrdi, tamnosivi siltozni i mjestimice bituminozni lapori i srednjezrnati vapnoviti pješčenjaci (LINARIĆ et al., 1986).

Donji panon (M_6^1)

Naslage donjeg panona također su nabušene samo na bušotinama JE-1 i JE-1DU. Naslage su izgrađene od sivosmeđih vapnovitih lapora koji se izmjenjuju sa smeđesivim tvrdim laporovitim vapnencima i tankim proslojcima vapnovitog pješčenjaka. Srednji dio naslaga razvijen je u tipskom facijesu „bijelih lapora“ (LINARIĆ et al., 1986).

Gornji panon (M_6^2)

Gornjopanonske naslage sastoje se od sitnozrnatog zalaporenog pješčenjaka u izmjeni sa sivim tvrdim laporom. U donjem dijelu naslaga razvili su se pješčenjaci zasićeni ugljikovodicima. Sastoje se od serije pješčanih slojeva nazvanih „Gama“ serija i čine ležišta nafte na polju Ježevo (LINARIĆ et al., 1986).

Donji pont (M_7^1)

U naslagama donjeg pontu prevladavaju sitnozrnati pješčenjaci u izmjeni sa sivim glinovitim laporima u gornjem dijelu, te vapnovitim laporima u donjem dijelu naslaga (LINARIĆ et al., 1986).

Gornji pont (M_7^2)

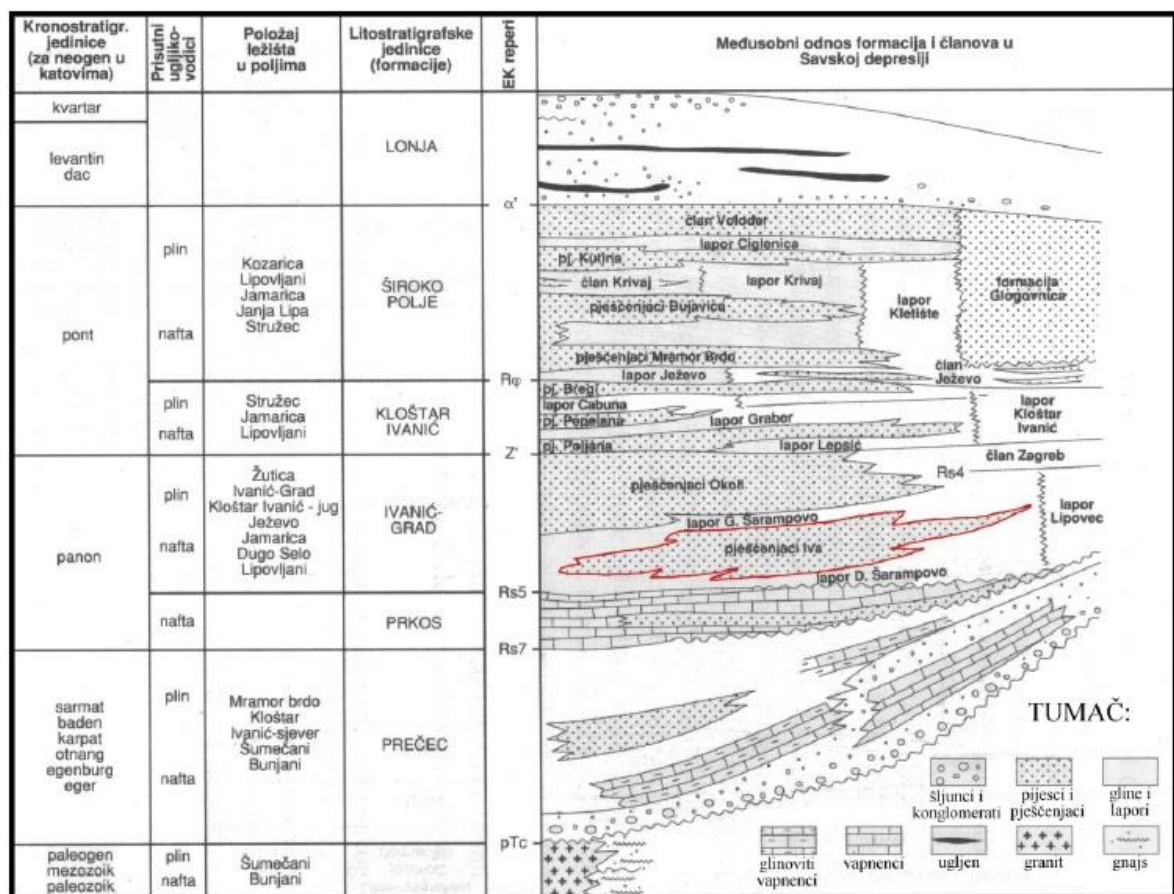
Naslage gornjeg pontu izgrađene su od sivog pjeskovitog lapora, sitnozrnatog zaglinjenog pijeska i fino zrnatog slabovezanog pješčenjaka (LINARIĆ et al., 1986).

Pliocen (Pl)

Naslage pliocena zastupljene su s žutim i sivozelenkastim glinama, zaglinjenim pijescima i fino zrnatim slabovezanim pješčenjacima (LINARIĆ et al., 1986).

Kvartar (Q)

U odnosu na ostale stratigrafske članove, naslage kvartara su najmanje debljine. Heterogenog su litološkog sastava u kojem prevladavaju humusne tvorevine, raznobojne, djelomično pjeskovite gline i interkalacije šljunaka (LINARIĆ et al., 1986).



Slika 2.2 Stratigrfske jedinice, litoški sastav i položaj važnijih ležišta u Savskoj depresiji (VELIĆ, 2007).

Na slici 2.2 prikazane su stratigrfske jedinice kronološkim slijedom, te njihov litoški sastav. Iva-pješčenjaci istaknuti su crvenom bojom te spadaju u najvažnije kolektore ugljikovodika u hrvatskom dijelu Panonskog bazena. Prema litostratigrfskom sustavu stratigrfskih jedinica radi se o najstarijem krupnijeklastičnom članu formacije Ivanić-Grad koji sadrži oko 30% ukupno otkrivenih rezervi nafte i plina u Hrvatskoj, a leži između Donjošarapovskih i Gornjošarapovskih lapora koji čine nepropusnu barijeru vertikalnoj migraciji ugljikovodika. Pješčenjaci su na osnovi petroloških analiza određeni kao litične subgrauvake i grau vake kalkarenitnog i kalklutitnog tipa, izgrađeni od detritičnog kvarca s nešto feldspata i dosta tinjaca. Šupljikavost kolektorskih stijena unutar Iva pješčenjaka iznosi 11 do 25%, no s dubinom opada, djelomice zbog rasta udjela silta, a djelomice zbog porasta zbijanja. Vodoravna propusnost izmjerena je između $0,1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ do $380 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$. Propusnost i šupljikavost u ležištu se mijenjaju na malim udaljenostima što treba uzeti u obzir prilikom izvođenja sekundarnih i tercijarnih metoda crpljenja (ĐUREKOVIĆ, 1995; KOVAČEVIĆ, 1996; LARVA, 1996; MATASOVIĆ, 1996).

2.4 Geološke karakteristike ležišta

Prema BARIŠIĆ (1985) u naftnom polju „Ježevo“ prevladava dinarsko pružanje struktura i osi tijela sedimenata. Autor se osvrće na izvršene paleostrukturne rekonstrukcije pomoću kojih je uočen nasljedni razvoj struktura uz njihovu diferencijaciju i inverzni razvoj. Također daje i kronološki slijed geoloških događaja na prostoru polja „Ježevo“ i okolici, koji su pridonijeli nastanku složenih strukturnih odnosa u tom polju. Tako kaže da je taloženje naslaga formacije Prečec započelo marinskom transgresijom u miocenu (baden i sarmat), a karakterizira ih sinklinalni paleoreljef debljine sedimenata do 1000 m. Tada ujedno dolazi i do uzdizanja jugozapadnog dijela taložnog prostora u smjeru najznačajnijeg horsta savske potoline Martinska Ves, odnosno predio Oborovo-Prečno na dubini od 400 m. Nakon toga slijedi taloženje formacije Prkos u brakičnom Panonskom jezeru za vrijeme donjeg panona, što predstavlja interval Rs7-Rs5. Dolazi do oplicavanja taložnog prostora i inverzije u kretanju što rezultira prestrukturiranjem na lokalitetima Ježevo, Posavski Bregi i Ivanić-Grad. U gornjem panonu započinje sedimentacija naslaga formacije Ivanić-Grad, tj. najstarijim naslagama grupe Sava (interval Rs5-Z'). Tu spadaju pješčenjaci Iva i Okoli koji se smatraju glavnim kolektorima savske potoline. Njihova sedimentacija karakterizirana je utojavanjem taložnog prostora usred čega dolazi do pojave boranja, reversnog rasjedanja i navlačenja. Upravo za vrijeme sedimentacije ovih naslaga formira se antiklinala Ježevo. Diferencijacija u tonjenju dna bazena, odnosno odlaganje sedimenata središnjeg dijela potoline u odnosu na rubne rezultiralo je tangencijalnim potiscima, formiranjem bora te reversnim rasjedanjem u polju Ježevo (BARIŠIĆ, 1985).

Prema VELIĆ (1980) polje Ježevo nalazi se u ivaničkoj zoni nakupljanja ugljikovodika. Zonu sa sjeveroistočne strane presijecaju „Glavni sjeverni potolinski“ rasjed i „Lonjski“ rasjed. Rasjedi su dinarskog pravca pružanja i normalnog karaktera. Neposredno su utjecali na sedimentaciju i konačnu asimetričnu građu Savske potoline. Na polju Ježevo nosioci rezervi ugljikovodika su Iva-pješčenjaci, odnosno kolektori pješčane serije „Gama“ koja pripada naslagama gornjeg panona. Pokrovne stijene čine gornjošarampovski lapori debljine i do 30 m koji sprječavaju vertikalnu migraciju ugljikovodika (LINARIĆ et al., 1986).

Ispitivanjem pojedinih slojeva utvrđeno je da je dubina zalijeganja kontakta nafta-voda za pojedine slojeve različita zbog dispergirane laporovite tvari unutar pješčanih kolektora, zbog čega su pješčani slojevi izdvojeni kao zasebne hidrodinamske jedinice, odnosno

ležišta (LINARIĆ et al., 1986). Korelacijom EK dijagrama izdvojeno je 17 pješćanih slojeva u pješćanoj seriji „Gama“ koji se mogu pratiti na čitavom području polja Ježevo. Neki tanji pješćani slojevi isklinjavaju na pojedinim dijelovima strukture, što je uzrokovano lokalnim oscilacijama tijekom njihove sedimentacije. Laponi koji razdvajaju pojedine pješćane slojeve predstavljaju izolator stijene unutar same pješćane serije, što je bio jedan od uvjeta da je u pojedinim pješćanim slojevima došlo do akumulacije ugljikovodika na području sjeverozapadnog i jugoistočnog nadsvođenja. Ekonomski značajne akumulacije ustanovljene su u slojevima, odnosno ležištima Gama4, Gama5, Gama9, Gama11, Gama13, Gama14 i Gama15. Prema Levorsenovoj klasifikaciji iz 1954. godine ležišta izdvojena unutar Gama serije pripadaju slojevitom antiklinalnom tipu ležišta. Ležište Gama4 je strukturno najviša pješćana jedinica zasićena ekonomski značajnim količinama ugljikovodika. Ležište Gama5 predstavlja gospodarski najvrjedniju pješćanu jedinicu izdvojenu unutar Iva-pješćenjaka. Nafta pripada srednje teškim naftama, a gustoća iznosi od 0,837 do 0,843 g/cm³ i sadrži 5,7% parafina (LINARIĆ et al., 1986).

3 KRATKI PRIKAZ METODE 3D-SEIZMIKE

3.1 Snimanje 3D-seizmike

Refleksijska seizmika danas je zbog najveće razlučivosti temeljna geofizička metoda u istraživanju ležišta ugljikovodika. Terenska mjerenja izvode se duž profila u vidu 2D ili 3D-seizmičkih mjerenja. Kod 2D mjerenja izvor i prijemnici nalaze na liniji snimanja, dok je kod 3D mjerenja linija prijemnika okomita na liniju izvora energije. Ovisno o namjeni istraživanja, prijemnici se prilikom mjerenja mogu postaviti u raznovrsne simetrične i asimetrične rasporede kako bi se dobili što bolji podaci mjerenja. Kao izvor energije mogu se koristiti vibrator, eksploziv, zračni ili vodeni top, a kao prijemnici geofoni ili hidrofonu u marinskim mjerenjima. Reflektirani signal dolazi od reflektora do geofona i snima se u digitalnom obliku. Točka paljenja (eng. *Shot Point*) je mjesto eksplozije ili vibracije, a geofoni ili hidrofonu su mjesta prijema. Prilikom metode višestrukog prekrivanja odziv se odnosi na zajedničku dubinsku točku (eng. *Common Depth Point*), odnosno, zajedničku refleksijsku točku (eng. *Common Reflection Point*) na

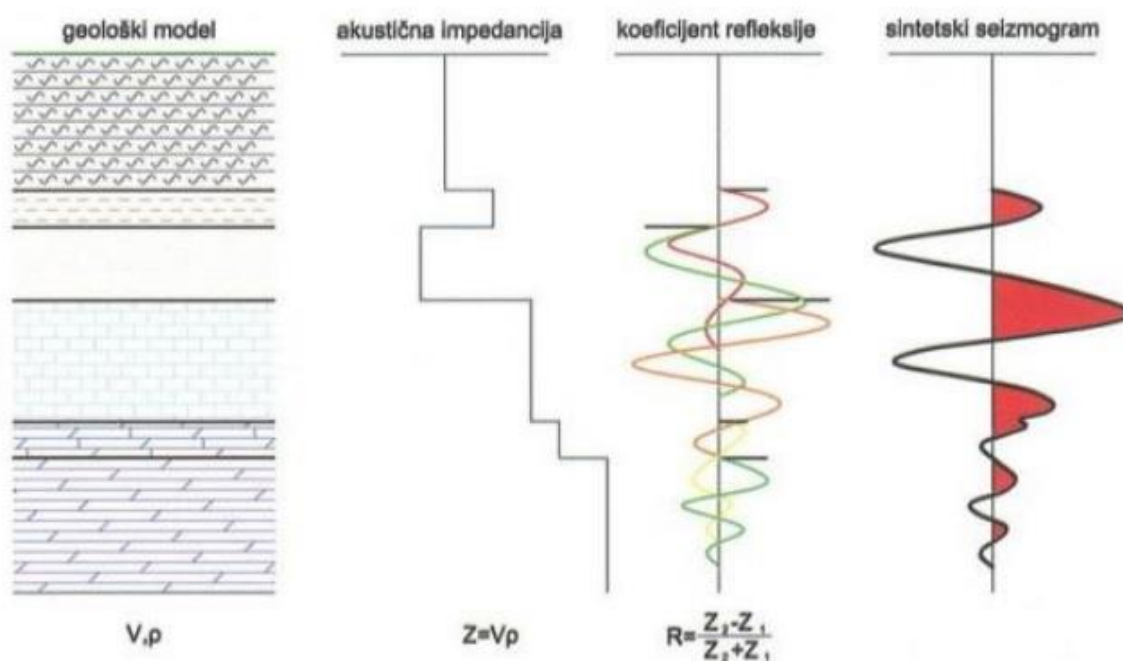
samom reflektoru. Projekcija točke na površini je zajednička središnja točka (eng. *Common Midd Point*). Ta točka se nalazi na polovici razmaka između točke paljenja i geofona. S obzirom da zajednička dubinska točka zbog zakona refleksije i nagiba reflektora nije uvijek točno na polovici između dvije točke paljenja, u obradi se koristi CMP kao zajednička točka na površini. Osnovni cilj metode višestrukog pokrivanja (eng. *Common Depth Point-CDP*) je dobiti više puta reflekske od svake točke u podzemlju, kako bi se zatim zbrajanjem tragova i ostalim korekcijama dobila bolja kvaliteta podataka, odnosno poboljšao omjer signal-šum. Reflekse se nastoji pojačati, a šumove prigušiti (ŠUMANOVAC, 2007).

Za izradu ovog rada korišteni su već postojeći seizmički podaci i karotažna mjerenja na polju Ježevo. Seizmički podaci potječu iz 1997. godine kada je mađarska tvrtka GES Kft iz Budimpešte izvela trodimenzionalna seizmička istraživanja sjeverozapadnog dijela Hrvatske u trajanju od jedne godine. Istražno područje 3D Sava-1 ima ukupnu površinu od oko 503 km² i presijeca ga rijeka Sava te autocesta Zagreb-Lipovac (KOVAČIĆ & ŽILAJKOVIĆ, 2001).

Izvori energije u točkama paljenja bili su vibrator i eksploziv. Projekt 3D Sava-1 sastoji se od 12 otkosa s po 6 paralelnih geofonskih linija u svakom otkosu, te 120 kanala po liniji, što rezultira sa 720 tragova po svakoj točki paljenja. Susjedni otkosi preklapaju se s po 3 geofonske linije. U pravilu se točke paljenja za svaki otkos nalaze između druge i pete geofonske linije pojedinog otkosa (po 8 točaka paljenja između svake linije). Teoretski razmak između linija točaka paljenja je 200 metara, a udaljenost između točaka paljenja u svakoj pojedinoj liniji je 50 metara te je takva konfiguracija snimanja omogućila nominalno prekrivanje od 4500%.

3.2 Zakoni brzina i sintetski seizmogram

Sintetski seizmogram je izračunati seizmički trag za zadani geološki model podzemlja. Njegova izrada, odnosno, seizmičko modeliranje (eng. *Forward Modelling*) može biti jednodimenzionalno (1D), dvodimenzionalno (2D) i trodimenzionalno (3D), no pojam sintetski seizmogram se najčešće odnosi na jednodimenzionalno 1D-seizmičko modeliranje. Sintetski seizmogram služi za njegovu usporedbu s izmjerenim površinskim seizmičkim podacima kako bi se refleksima na profilu pridružile stratigrafske i litološke granice određene karotažnim mjerenjima u bušotini. Stoga, može se reći da je osnovna namjena sintetskog seizmograma povezivanje bušotinskih podataka u dubinskom mjerilu i seizmičkih podataka u vremenskom mjerilu što pomaže preciznijem kartiranju i praćenju granica. Osim toga omogućuje sigurnije odvajanje višestrukih refleksa i odvajanje promjena polariteta i pomaka faza što ukazuje na litološke promjene i promjene fluida u stijenama (ŠUMANOVAC, 2012). Primarna pretpostavka pri izradi sintetskog seizmograma je da se seizmički trag sastoji od zbroja svih refleksa s pojedinih granica u modelu podzemlja. Osim toga pretpostavlja se da seizmički val reflektiran na granici ima isti oblik kao ulazni val.



Slika 3.1 Skica izrade sintetskog seizmograma (SHERIFF, 1978).

Prilikom izračuna sintetskog seizmograma svaki sloj ulaznog modela definiran je umnoškom brzine rasprostiranja seizmičkih valova (V) i gustoće (ρ), koji se naziva akustična impedancija (Z), slika 3.2. Gustoća i brzina su proporcionalne vrijednosti ovisne jedna o drugoj, no promjene brzina u stijenama ipak su zamjetnije ($\pm 50\%$) od promjene gustoća ($\pm 20\%$) te se stoga može uzeti u obzir i samo brzina. Ulazne podatke brzine i gustoće za izradu sintetskog seizmograma daju karotažna mjerenja u bušotini. Podaci brzine dobivaju se iz zvučnih karotaža, a gustoće iz karotaže gustoće, tj. γ - γ karotaže.

Ukoliko izostaju podaci gustoće može se uzeti konstantna gustoća za cijeli model ili gustoća izračunata iz brzine pomoću neke od empirijskih formula, npr. Gardnerovog zakona (GARDNER et al., 1974).

Koeficijent refleksije (R) na granici slojeva računa se pomoću izraza:

$$R = \frac{A_2}{A_1} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} = \frac{v_2 \rho_2 - v_1 \rho_1}{v_2 \rho_2 + v_1 \rho_1} \quad (3-1)$$

gdje su:

R – koeficijent refleksije,

A_1, A_2 – amplitude upadnog i reflektiranog vala,

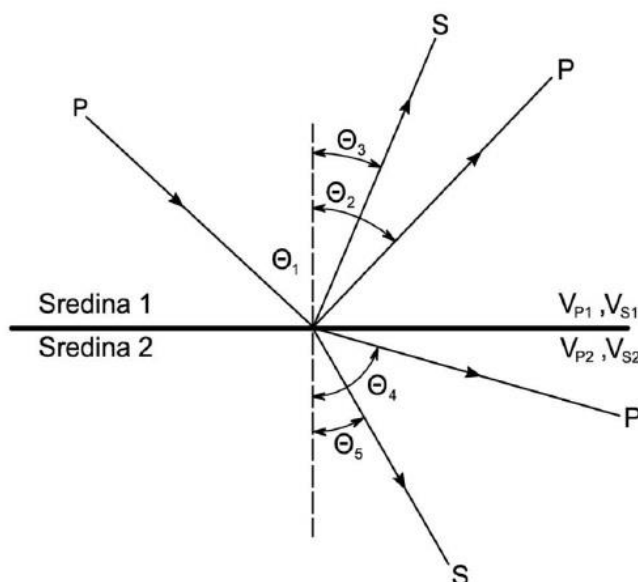
Z_1, Z_2 – akustične impedancije iznad i ispod granice dvaju slojeva,

v_1, v_2 – brzine P-valova iznad i ispod granice dvaju slojeva,

ρ_1, ρ_2 – gustoća gornjeg i donjeg sloja.

Ako P-val u podzemlju upada na granicu dvaju sredstava različite gustoće i brzine pod bilo kojim kutom osim pravog, raspodjela energije je složenija pa njegovim lomom i refleksijom nastaju 4 valne zrake: 2 S-vala i 2 P-vala kako je prikazano na slici 3.3. Prilikom okomitog upada P-vala na granicu ne nastaju S-valovi. Umjesto toga P-val prolazi kroz granicu bez lomljenja. Jedna od namjena sintetskog seizmograma je odvajanje višestrukih refleksa, zbog čega se u 1D-sintetskom seizmogramu pretpostavljaju vodoravne granice, homogeni slojevi i okomiti upad P-vala na granicu. Ukoliko je sredstvo koje se

nalazi ispod reflektora veće brzine te time ekvivalentno i veće gustoće, koeficijent refleksije će biti pozitivan, no ukoliko su brzina i gustoća sredstva ispod granice manje, koeficijent refleksije će imati negativan predznak.



Slika 3.2 Prikaz upada P-vala na granicu dvaju sredstava različite brzine i gustoće pod kutem različitim od pravog (Snellov zakon).

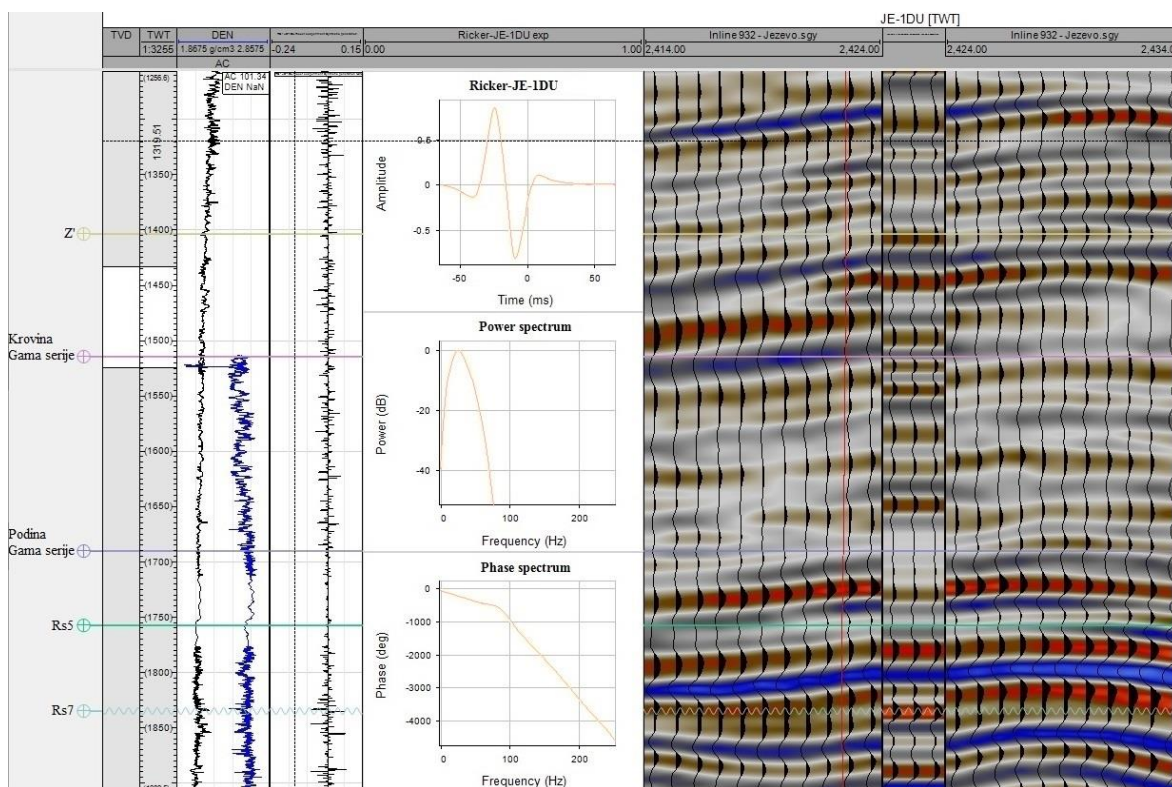
4 INTERPRETACIJA

Interpretacija seizmičkih podataka polja Ježevu izrađena je u programu PetrelTM 2014. Postupak interpretacije uključuje praćenje horizonata na cijelom volumenu 3D-seizmičkih podataka te strukturno-tektonsku interpretaciju. Prilikom postupka interpretacije koristila se analiza raznovrsnih volumnih i površinskih seizmičkih atributa koja je omogućila lakše i preciznije praćenje horizonata i određivanje položaja rasjeda o čemu će više biti riječi u 5. poglavlju. Prije same interpretacije bilo je nužno napraviti sintetski seizmogram kako bi litološkim i stratigrafskim granicama određenim u bušotini pridružili reflekske.

4.1 Izrada sintetskog seizmograma

Za izradu sintetskog seizmograma korištene su krivulje zvučne karotaže i karotaže gustoće izmjerene u bušotini JE-1DU. S obzirom da je mjerenje karotaže gustoće za bušotinu JE-1DU počelo tek na dubini od 1900 m pa do 3200 m, pri izradi sintetskog seizmograma je bilo potrebno upotrijebiti Gardnerov zakon. Na temelju Gardnerovog zakona iz podataka zvučne karotaže bušotine JE-1DU koja je pokrivala dubinu od 200-3500 m izračunata je gustoća u plićem dijelu bušotine koji izvorno nije bio pokriven.

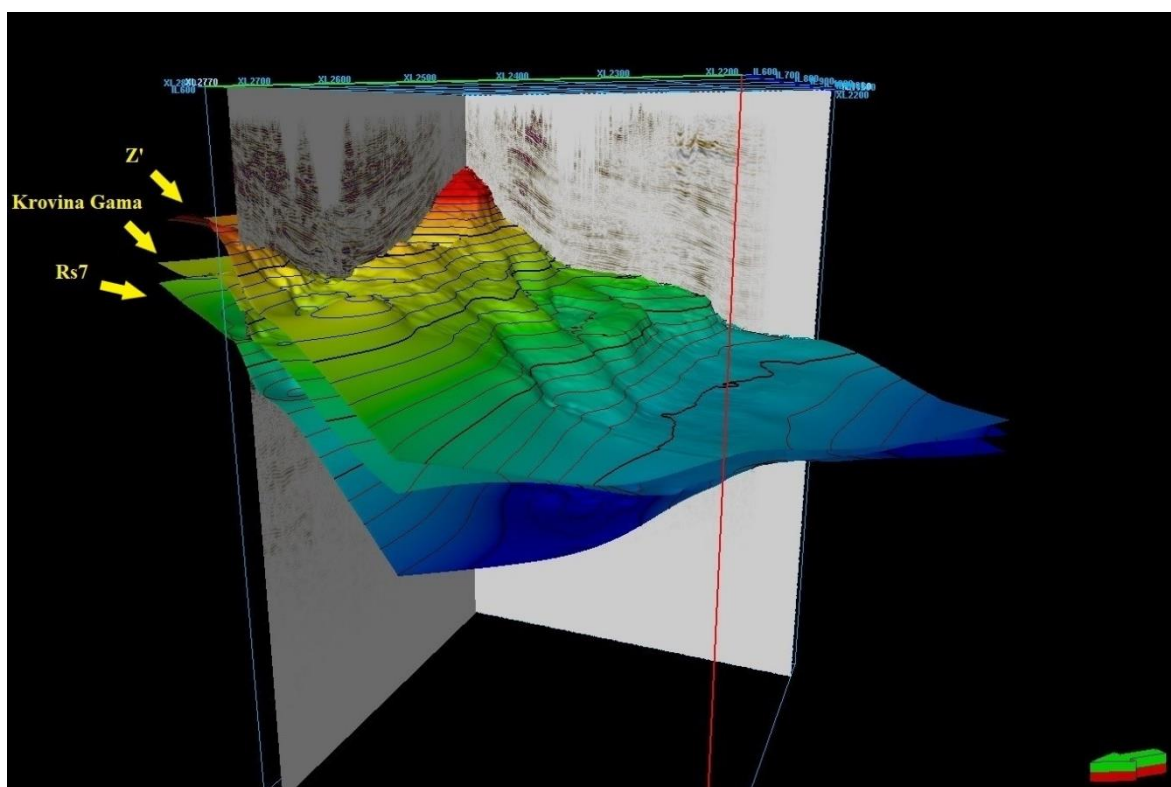
Prilikom odabira ulaznog valića isprobavale su se razne metode izrade: deterministička, statistička i analitička, no naposljetku je radi najboljeg podudaranja odabrana analitička metoda. Korišten je *Rickerov* valić frekvencije 27 Hz. Ta frekvencija dala je sintetski seizmogram koji se poprilično dobro podudarao s površinskim seizmičkim podacima što je prikazano na slici 4.1.



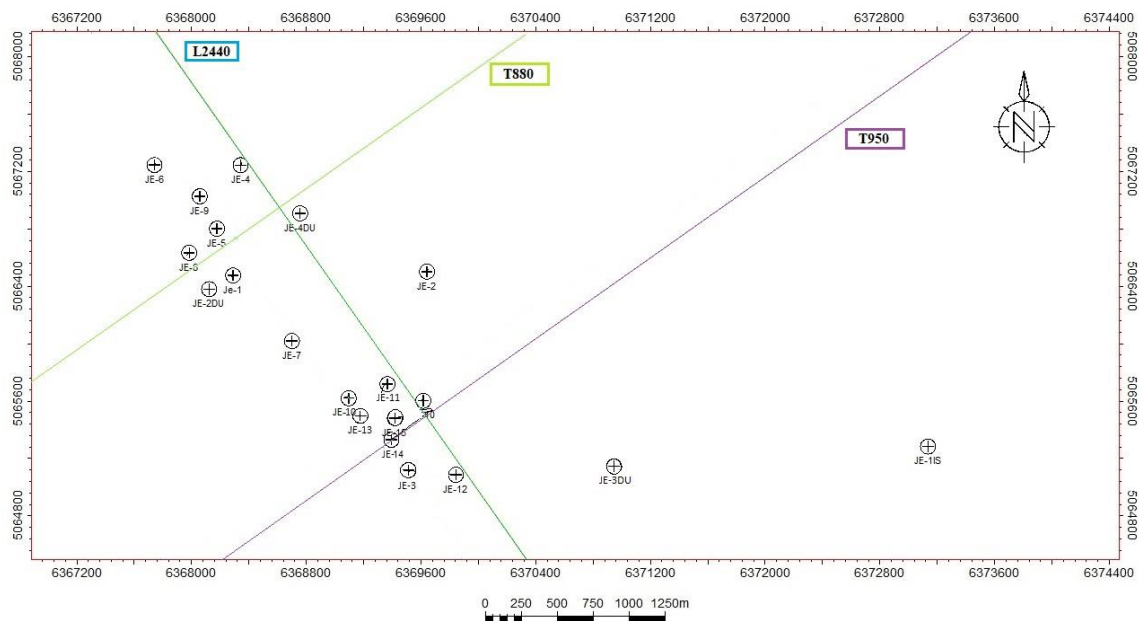
Slika 4.1 Sintetski seizmogram za bušotinu JE-1DU s ulaznim karotažnim podacima te odabranim valićem

4.2 Interpretacija seizmičkih horizonata

Interpretacija horizonata izrađena je djelomično automatski, a djelomično ručno. Najprije se isprobalo automatsko (eng. *3D-autotracking*) praćenje refleksa, no zbog velike tektonske poremećenosti polja te time i diskontinuiranosti seizmičkih refleksa bilo je potrebno ručno korigirati horizonte. Ručna interpretacija horizonata (eng. *Manual-tracking*) provedena je na svakom 10-om poprečnom (Inline) i uzdužnom (Xline) profilu. Za interpretaciju su odabrane krovine elektrokarotažnih markera Z' i Rs7 te krovina Gama serije, a njihova dubina u vremenskom mjerilu tj. dvostrukom vremenu putovanja vala (eng. *Two-way_Traveltime* - TWT) i položaj na refleksima određeni su pomoću sintetskog seizmograma prikazanog na slici 4.1. Položaj odabranih profila sa važnijim bušotinama prikazani su na slici 4.3. Na slici 4.2 prikazane su površine interpretiranih horizonata.



Slika 4.2 Trodimenzionalni prikaz interpretiranih horizonata



Slika 4.3 Odabrani profila s važnijim bušotinama na polju Ježevó

1) Seizmička interpretacija krovine EK-markera Z'

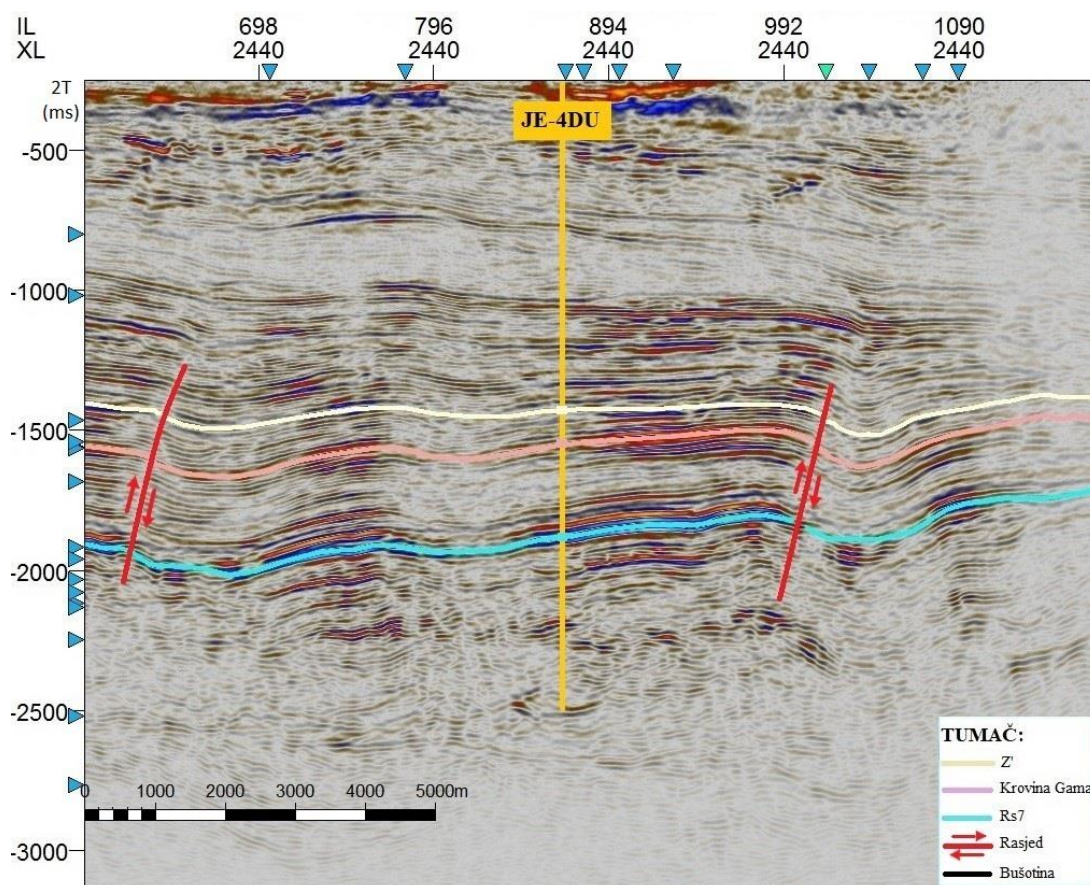
Horizont Z' dijeli formacije Ivanić-Grad i Kloštar Ivanić, odnosno granica je gornjeg panona i donjeg pontaa. Osim toga, sedimenti intervala Rs5-Z' odgovaraju gornjem panonu i sadrže akrozonu *Congerina Banatica*, tj. „Banatica naslage“. Litološki prevladavaju žućkasti lapori u izmjeni s pješčenjacima koji mogu poslužiti kao kolektori za nakupljanje ugljikovodika (MALVIĆ & SAFTIĆ, 2008). Pomoću sintetskog seizmograma prikazanog na slici 4.1 horizont Z' određen je u vremenskom mjerilu na dubini od oko 1400 ms i smješten na pozitivnoj amplitudi. Na slici 4.4 prikazan je uzdužni seizmički profil L₂₄₄₀ sa pružanjem u smjeru sjeverozapad-jugoistok. Na profilu su vidljivi interpretirani horizonti sa rasjedima i bušotinom JE-4DU. Pružanje rasjeda je također sjeverozapad-jugoistok.

2) Seizmička interpretacija krovine Gama serije

Krovina Gama serije je granica serije pješćanih kolektorskih slojeva Gama u kojima su formirana ležišta nafte i pokrovnih stijena Iva-pješčenjaka koje čine gornjošarapovski lapori debljine do 30 m (LINARIĆ et al., 1986). Horizont krovine Gama serije određen je na dubini od oko 1510 ms i smješten je na negativnoj amplitudi, što je posljedica smanjenja akustične impedancije na kontaktu lapora i plinom zasićenog pješčenjaka velike šupljikavosti (slika 4.4).

3) Seizmička interpretacija EK-markera Rs7

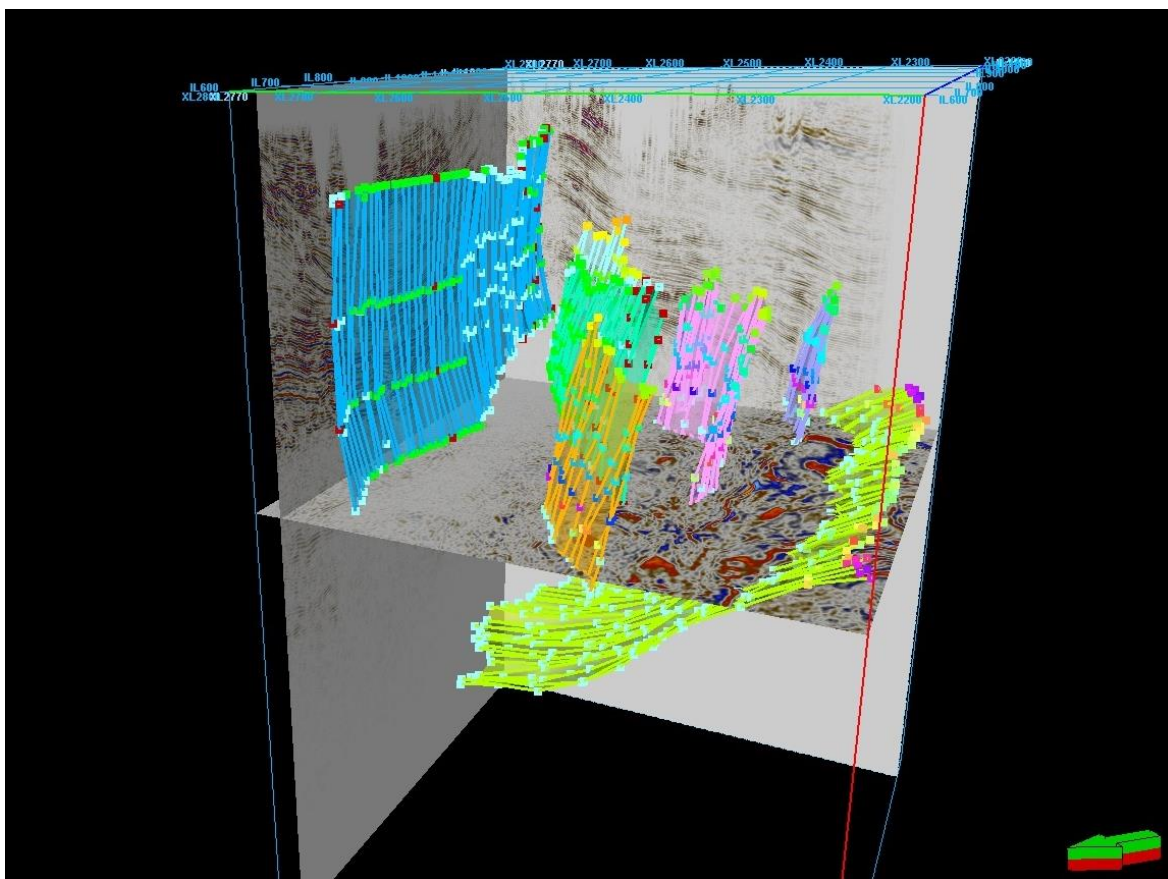
EK-marker Rs7 litostratigrafski dijeli sedimente formacije Prečec koja predstavlja stariji dio grupe Moslavačka gora i Prkos, tj. naslage sarmata i donjeg panona. Formacija Prečec je litološki heterogena. Izmjenjuju se tamni, tvrdi glinoviti vapnenci, siltni lapori i kvarcno-kalkarenitni pješčenjaci (MALVIĆ & SAFTIĆ, 2008). Horizont Rs7 određen je na dubini od oko 1840 ms i nalazi se na pozitivnoj amplitudi (slika 4.4).



Slika 4.4 Uzdužni seizmički profil L₂₄₄₀

4.3 Strukturno-tektonska interpretacija

Rasjedi su interpretirani na svakom 10-om profilu, a radi veće preciznosti prilikom interpretacije se koristio vremenski presjek (eng. *Time slice*) i seizmički atributi. Veći sustavi rasjeda najprije su interpretirani pomoću automatskog praćenja rasjeda koje se nije pokazalo kao veoma precizno, te su stoga rasjedi naknadno ručno korigirani.

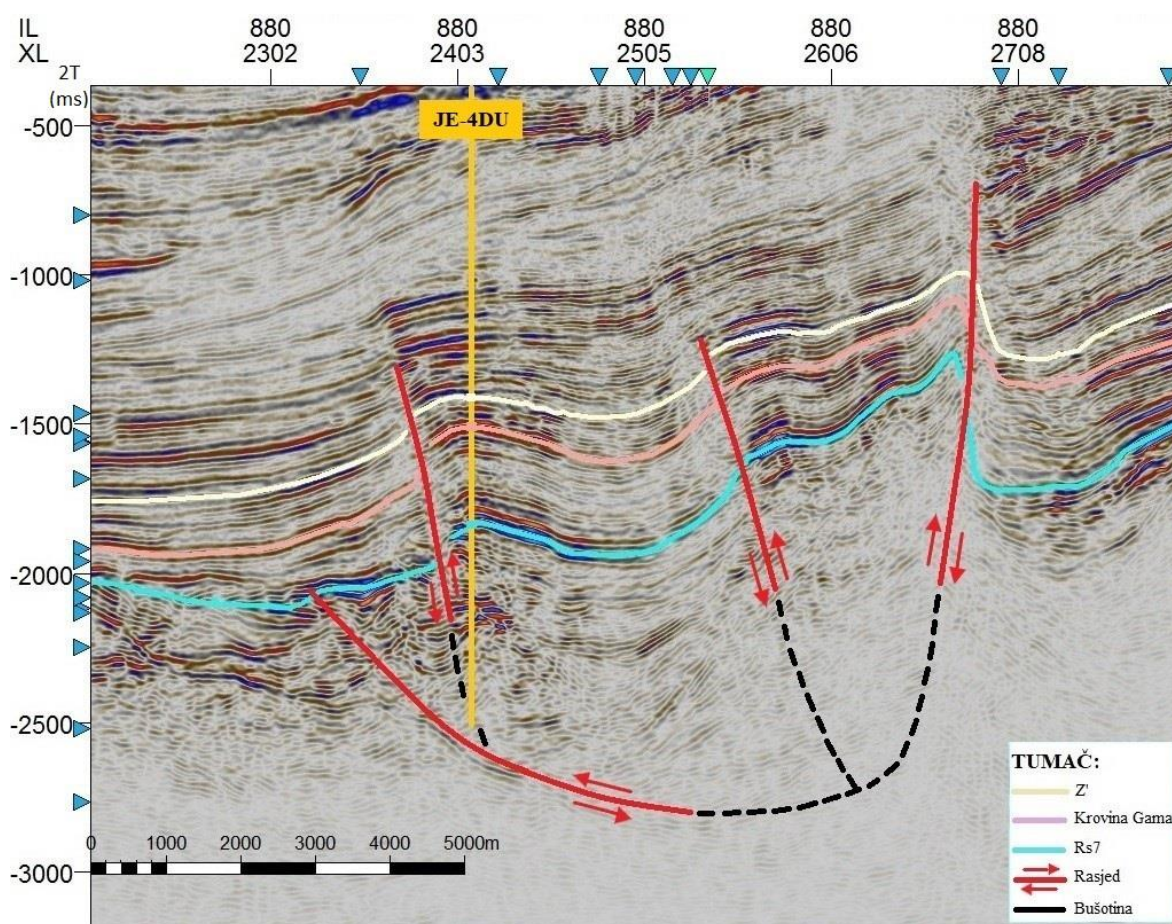


Slika 4.5 Trodimenzionalni prikaz interpretiranih rasjeda

Na naftnom polju „Ježevo“ izdvojena su dva zasebna strukturna nadsvođenja: sjeverozapadno i jugoistočno. Nadsvođenja imaju formu blago položenih antiklinala s uzdužnim osima koje su odvojene blagim sedlom. Sjeverozapadna antiklinala pruža se u smjeru sjeverozapad-jugoistok, odnosno dinarskom pravcu pružanja, dok se antiklinala na jugoistočnom dijelu polja pruža više u smjeru istok-zapad. Ovo zakretanje pravca pružanja prisutno je i kod rasjeda te se odražava na cjelokupnu tektoniku. Slijedeće važne značajke strukturnih odnosa predstavljaju reversni rasjedi koji su utvrđeni i interpretirani na uzdužnim i poprečnim seizmičkim profilima (BARIŠIĆ, 1985).

Panonski bazenski sustav pripada skupini zalučnih bazena (engl. *back-arc basins*). Njegovo stvaranje u otnangu započelo je konvergencijom i subdukcijom Apulijske ploče pod Dinaride. Tada je započelo i stvaranje njegove južne granice (perijadransko-varždarskog lineamenta) i sjeverne granice (Vanjski Karpati). U prostoru između njih otvorene su brojne ekstenzijske strukturne depresije uz desne i lijeve transkurentne rasjedne sustave (engl. "*dextral and sinistral strike-slips*"), a posljedica je nastanak bazena, potonina i uleknina (ROYDEN, 1988).

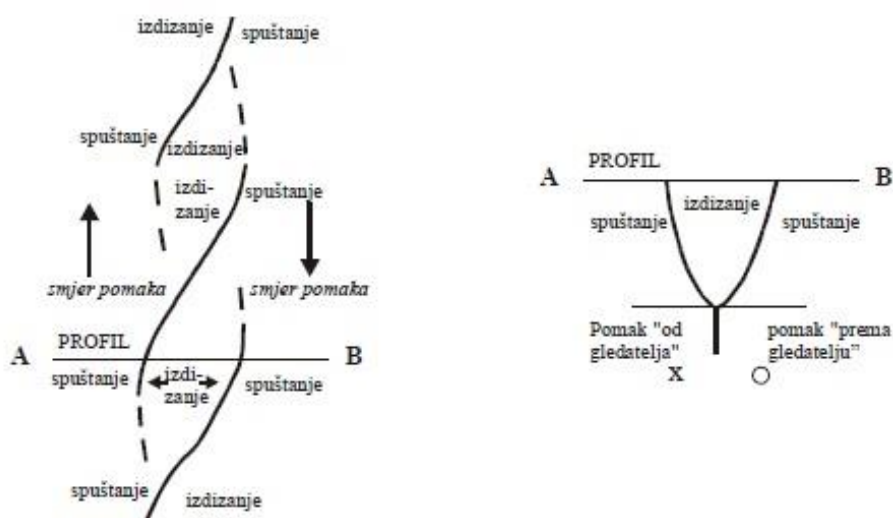
Za vrijeme najmlađeg razdoblja pliocena i kvartara u tektonskom pogledu dolazi do izražene kompresije formirajući reverzne i navlačne odnose, s čestim reaktivacijama starijih rasjedih ploha, a dolazi i do inverzije pomaka na istom rasjedu. Tijekom kompresijske faze dolazi do promjene orijentacije regionalnog stresa (sjever-jug). Rubni dijelovi depresija se uz te rasjede izdižu i dolazi do resedimentacije materijala (RÖGL, 1996, 1998).



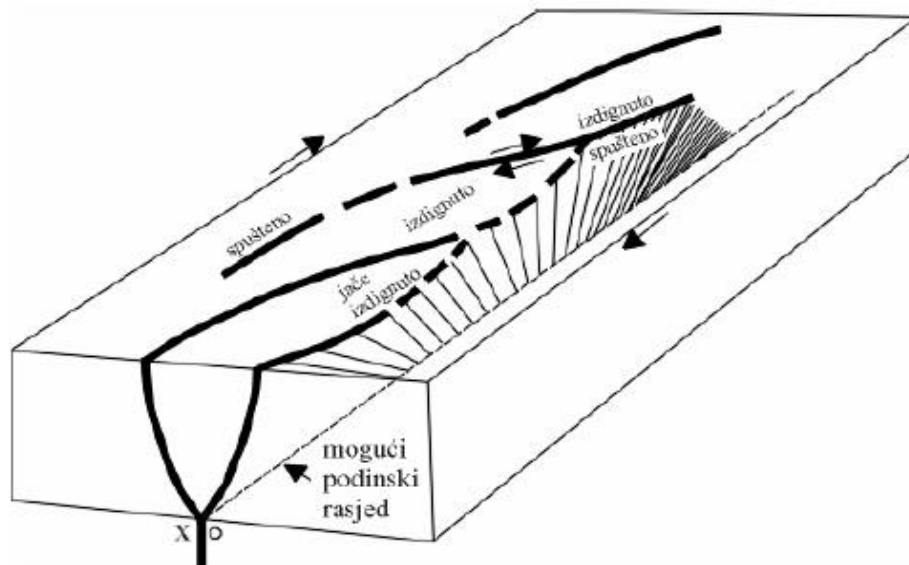
Slika 4.6 Poprečni seizmički profil T₈₈₀

Slika 4.6 prikazuje poprečan profil T_{880} koji se pruža u smjeru jugozapad-sjeveroistok i prolazi veoma blizu bušotine JE-4DU. Interpretirane su paraklaze rasjeda, a glavni kriterij određivanja položaja rasjeda bio je prekid kontinuiteta refleksa. Promatrajući relativni pomak krovinskog krila u odnosu na podinsko krilo utvrđeno je da je krovinsko krilo izdignuto u odnosu na podinsko te su rasjedi karakterizirani kao reversni. Crtkanim linijama je označen pretpostavljeni rasjed.

Na slici 4.7 mogu se zamijetiti sustavi rasjeda na krilima antiklinala koji čine pozitivnu cvjetnu strukturu. Ti sustavi nastali su kao posljedica horizontalne komponente stresa koja se javila uzduž zakrivljene trase njihova pružanja čiji shematski prikaz se može zamijetiti na slici 4.9A, dok se 3D-model prostora zahvaćenog jakim horizontalnom tektonikom može promotriti na slici 4.8 gdje se kao posljedica zakrivljenosti paraklaze u horizontalnoj ravnini uočava kako vertikalni pomaci na suprotnim krajevima istog krila imaju suprotan karakter (MALVIĆ, T., SAFTIĆ, B., 2008).

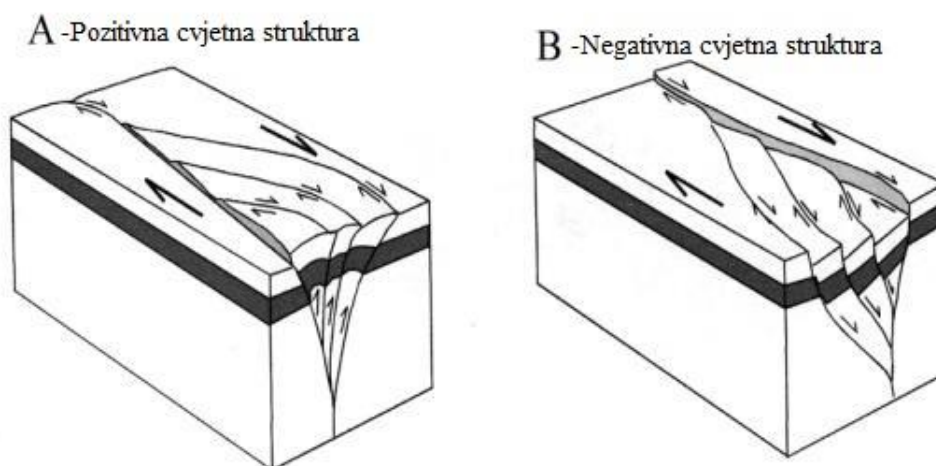


Slika 4.7 Shematski prikaz deformacija uzrokovanih jakim horizontalnim stresom (MALVIĆ & SAFTIĆ, 2008).

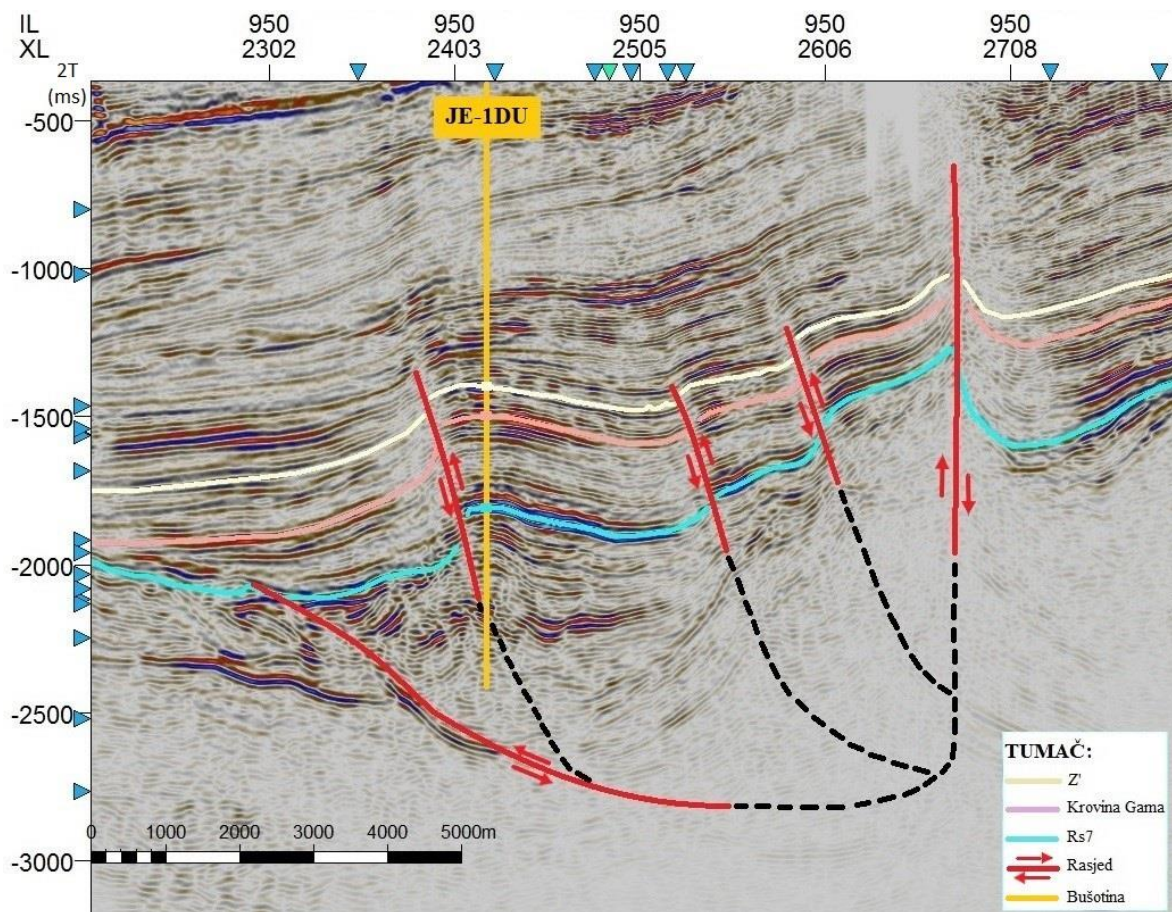


Slika 4.8 3D-prikaz prostora zahvaćenog jakom horizontalnom tektonikom (MALVIĆ & SAFTIĆ, 2008)

Ukoliko je horizontalna komponenta vrlo jaka nastat će izdignute ili spuštene strukture koje se nazivaju pozitivnim ili negativnim cvjetnim strukturama (engl. "*Flower or inverse flower structures*") (MALVIĆ & SAFTIĆ, 2008). Njihov 3D-prikaz skiciran je na slici 4.8 gdje se jasno vidi razlika između pozitivne i negativne cvjetne strukture.



Slika 4.9 Prikaz pozitivne i negativne cvjetne strukture (DREW, 2003).



Slika 4.10 Poprečni seizmički profil T₉₅₀

Na slici 4.10 može se primijetiti kako se uslijed rasjedanja javljaju uzdignuta područja (eng. „*Pop-up*“) koja nastaju kao posljedica horizontalne komponente stresa koji se javlja cijelom dužinom njihova pružanja. Uočljiva su dva glavna rasjeda, vanjski sa lijeve strane profila i vanjski sa desne strane profila po kojima je došlo do kompresije. Smjer pružanja tih rasjeda je sjeverozapad-jugoistok, dok je pružanje manjih reversnih rasjeda između njih u smjeru istok-zapad. Nastanak ovog transkurentnog rasjeda započelo je u otnangu, a inverzni rasjedi u središnjem dijelu profila su nastali kao posljedica izražene kompresije područja za vrijeme pliocena i kvartara što je rezultiralo stvaranjem pozitivne cvjetne strukture na polju Ježevo.

5 SEIZMIČKI ATRIBUTI

Seizmički atributi omogućuju transformaciju snimljenih seizmičkih podataka iz jednog oblika u drugi pomoću raznovrsnih tehnika. Izmjena prikaza klasičnih seizmičkih podataka omogućuje analizu podataka na novim prikazima što najčešće rezultira zapažanjima geoloških značajki koje su na klasičnim seizmičkim prikazima bile nerazpoznatljive (TANER et al., 1979).

Seizmički atributi u užem smislu su rezultat matematičkog prikaza seizmičkog signala kao kompleksne funkcije. Kompleksna funkcija sadrži realnu i imaginarnu komponentu. Realnu komponentu kompleksne funkcije predstavlja snimljeni seizmički trag, dok se imaginarna izračunava iz realne primjenom Hilbertove transformacije (OREŠKOVIĆ, 2006). TANER et al. (1979) predstavili su koncept Hilbertove transformacije za izračun osnovnih, trenutnih atributa na osnovi amplitude, faze i frekvencije. Svi ostali seizmički atributi izvode se različitim matematičkim operacijama iz temeljnih atributa (OREŠKOVIĆ, 2006).

Seizmički atributi danas su jedan od temeljnih alata pri istraživanju i razradi ležišta ugljikovodika. Pridonose preciznijoj karakterizaciji ležišta i kvantificiranju rezervoarskih svojstava. Primjena seizmičkih atributa je raznovrsna pa se osim za istraživanje i razradu ležišta ugljikovodika koriste i za precizniju strukturno-tektonsku interpretaciju, definiranje regionalnih odnosa i odnosa taložnih jedinica (ŠUMANOVAC, 2012).

Postoji više različitih podjela seizmičkih atributa, no najčešća je podjela u dvije grupe (TANER, et al. 1994):

- fizički atributi
- geometrijski atributi ili razmještaj (konfiguracija) refleksa.

Međutim, u programskom paketu PetrelTM 2014 nalazi se drugačija podjela koja je korištena prilikom izrade seizmičkih atributa u ovom radu (SCHLUMBERGER, 2007):

- atributi kompleksnog seizmičkog traga,
- strukturni atributi,
- stratigrafski atributi,
- površinski seizmički atributi.

U attribute kompleksnog seizmičkog traga spadaju trenutna faza, trenutna amplituda, trenutna frekvencija, kosinus trenutne faze i dr. koji se koriste za određivanje litoloških ili rezervoarskih značajki. Strukturni atributi olakšavaju određivanje i precizno praćenje sustava rasjeda i ostalih diskontinuiteta. U ovu grupu atributa spadaju varijanca, atribut prekida tragova (eng. *ant-tracking*), lokalni strukturni kut nagiba, devijacija kuta nagiba, strukturno zaravnjenje i dr. Stratigrafski atributi koriste se prilikom interpretacije kanalnih ispuna, grebenskih struktura, a korisni su i pri interpretaciji diskontinuiteta kao npr. atribut kaos.

Površinski seizmički atributi dijele se na:

- amplitudne attribute,
- statističke attribute,
- attribute oblika signala,
- attribute mjerljivog intervala (eng. *measurable interval*).

Površinski seizmički atributi izračunavaju se unutar određenog intervala koji može biti samo uz pojedinačni horizont, između dvaju horizonta ili u proizvoljnom vremenskom prozoru (SCHLUMBERGER, 2007).

5.1 Hilbertova transformacija

Prikaz analize kompleksnog seizmičkog traga u ovom radu napravljen je po uzoru na OREŠKOVIĆ (2006) i ŠUMANOVAC (2012).

Analiza kompleksnog seizmičkog traga počela se primjenjivati u seizmičkoj interpretaciji ranih 1970-tih kada su TANER i dr. promatrajući širenje seizmičkih valova u smislu jednostavnog harmoničkog gibanja zaključili da snimljeni seizmički signal predstavlja kinetički dio ukupne energije gibanja čestice prilikom širenja seizmičkog vala. Na temelju tog opažanja razvijena je metoda koja je omogućavala izračunavanje potencijalne energije iz kinetičke energije, uz pomoć korištenja Hilbertove transformacije. Upotrebom Hilbertove transformacije u frekvencijskom i vremenskom području, omogućilo se praktično izračunavanje svih kompleksnih seizmičkih atributa.

Širenje seizmičkih valova kroz stijene opisano je valnom jednačbom čija su rješenja sinusoidalne funkcije koje se mogu prikazati pomoću linearne kombinacije kompleksnih

funkcija. Realnu ($x(t)$) i imaginarnu ($y(t)$) komponentu kompleksnih nizova moguće je povezati koristeći Hilbertovu transformaciju slika 5.1. Inverznom Fourierovom transformacijom dobiva se funkcija čiji je realni dio nepromijenjen, dok je imaginarni dio jednak Hilbertovoj transformaciji ulaznog signala.

$$s(t) = x(t) + y(t) \quad (5-1)$$

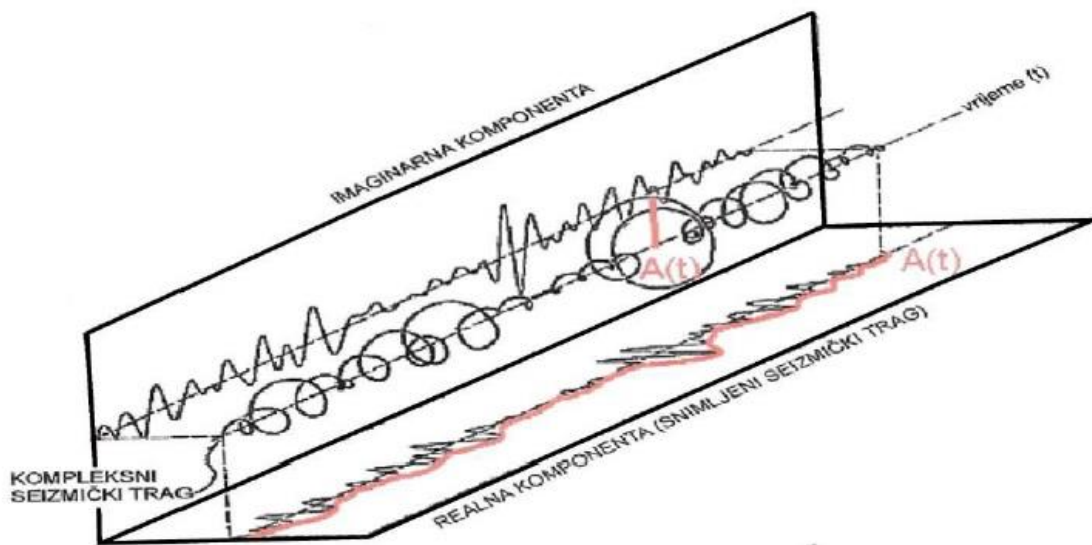
$$y(t) = H[x(t)] \quad (5-2)$$

gdje je: $s(t)$ – kompleksni seizmički signal,

$x(t)$ – realni dio,

$y(t)$ – imaginarni dio,

H – Hilbertova transformacija.



Slika 5.1 Grafički prikaz kompleksnog seizmičkog traga; $A(t)$ - trenutna amplituda (OREŠKOVIĆ, 2006).

S obzirom da je cilj dobiti oblik seizmičkog traga u polarnim koordinatama, amplituda i faza u tom slučaju daju novu perspektivu:

$$x(t) = A(t)\cos\theta(t), \quad (5-3)$$

gdje je: $A(t)$ – amplituda,

$\theta(t)$ – faza.

Imaginarni dio seizmičkog traga, Hilbertova je transformacija realne funkcije, a kako je Hilbertova transformacija funkcije $\cos(t)$, $\sin(t)$, $s(t)$ je:

$$A(t) = \sqrt{x^2(t) + H[x(t)]^2} = |s(t)| \quad (5-4)$$

$$\theta(t) = \arctg \frac{H[y(t)]}{x(t)} \quad (5-5)$$

Trenutna amplituda $A(t)$ i faza $\theta(t)$ predstavljaju polarni oblik kompleksnog seizmičkog traga, odnosno predstavljaju sam seizmički signal te se nazivaju temeljnim atributima.

Trenutna frekvencija se izračunava iz faze, prema izrazu:

$$\omega(t) = \frac{d\theta(t)}{dt}, \quad (5-6)$$

gdje je: $\omega(t)$ – trenutna funkcija

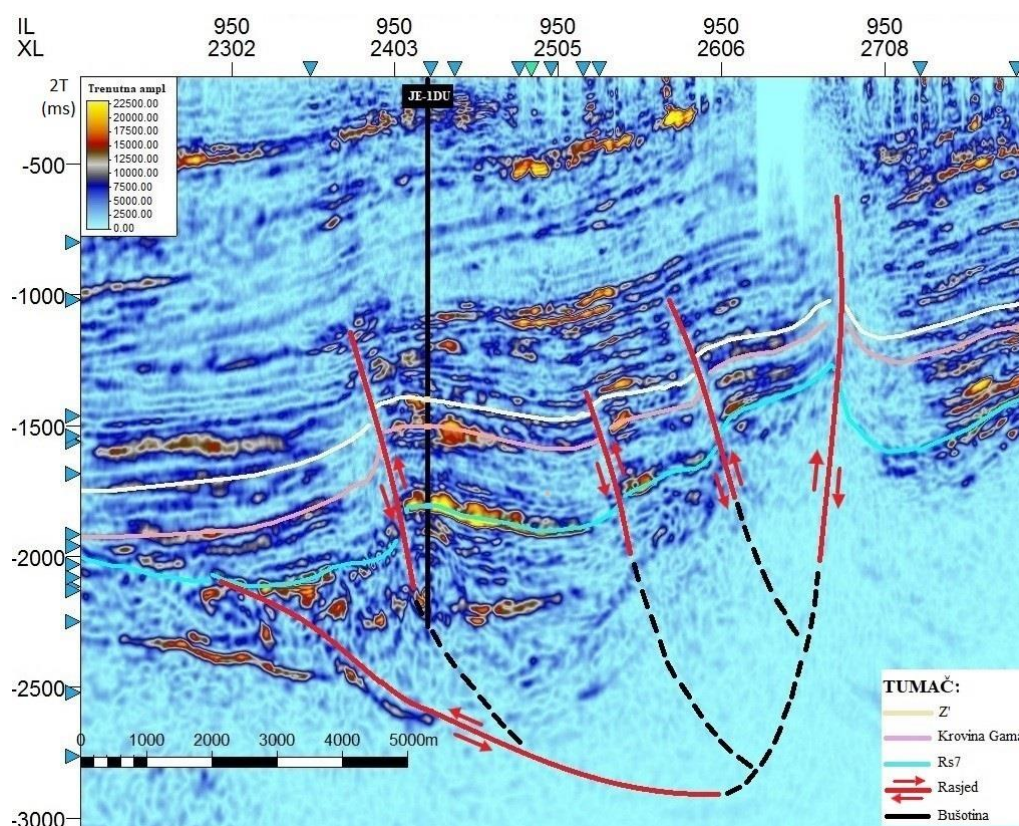
5.2 Primjena seizmičkih atributa u interpretaciji

Prilikom interpretacije horizonata na polju Ježevo najkorisnijima su se pokazali kompleksni atributi; atributi trenutne amplitude i kosinus faze. Strukturno-tektonska interpretacija ispostavila se mnogo zahtjevnijom od interpretacije horizonata što je posljedica komplicirane strukturne građe polja kao posljedica djelovanja jakih tektonskih sila tijekom tektonske evolucije Panonskog bazena, posebice na njegovom jugozapadnom dijelu. Prilikom interpretacije sustava rasjeda posebno su se korisnima pokazali strukturni atributi varijanca i atribut prekida tragova (eng. *Ant-tracking*), te stratigrafski atribut kaosa. Korišten je i seizmički kalkulator koji je omogućio izradu novih virtualnih prikaza seizmičkog volumena i poboljšanje već izračunatih atributa.

5.2.1 Trenutna amplituda

Trenutna amplituda (engl. *Envelope*) koja je također poznata kao snaga refleksije (eng. *Reflection strength*), instantna energija i magnituda, definirana je kao ukupna energija seizmičkog traga. Odnosno, to je modul ili apsolutna vrijednost kompleksnog seizmičkog traga koji sadrži realni i imaginarni dio (SCHLUMBERGER, 2007). Izračunava se izrazom (5-4).

Trenutna amplituda je neovisna o fazi i uvijek ima pozitivnu vrijednost. Predstavlja kontrast akustične impedancije, tj. reflektivnost. Iznimno je dobar pokazatelj značajnih litoloških promjena susjednih slojeva uzrokovanih snažnim refleksijama energije i sekvencijskim granicama te tako omogućuje raspoznavanje značajki koje nisu prepoznatljive na klasičnim seizmičkim prikazima. Upravo zato predstavlja važan atribut za detekciju pojave plina koja se očituje u obliku svijetlih mrlja na seizmičkim profilima (eng. *Bright spots*). Analiza amplitude najčešće se primjenjuje prilikom kartiranja paleoreljefa, starih taložnih sredina, pa čak i diskordancija (SCHLUMBERGER, 2007).



Slika 5.2 Poprečni profil T_{950} prikazan atributom trenutne amplitude

Slika 5.2 prikazuje trenutnu amplitudu poprečnog profila T_{950} pravca pružanja sjeveroistok-jugozapad. Visoke vrijednosti amplituda prikazane su žutom bojom, dok su niske amplitude plave boje. Visoke vrijednosti amplituda mogu ukazivati na zasićenje, no najčešće su rezultat povišene akustične impedancije kao posljedica promjene litologije, odnosno seizmičkih brzina. Na profilu se jasno mogu uočiti povišene vrijednosti amplitude unutar Gama serije pješčenjaka što je najvjerojatnije rezultat zasićenosti ugljikovodicima. Isto tako, na profilu se mogu uočiti povišene vrijednosti amplituda na elektrokarotaznom markeru Rs7 koje upućuju na povišene akustične vrijednosti uslijed prelaska u laporovite vapnence koji pri većim dubinama prelaze u plinonosne biogene vapnence zasićene naftom. Trenutna amplituda pokazala se i kao vrlo dobar atribut prilikom interpretacije rasjeda s obzirom da na diskontinuitetima dolazi prekida refleksa što se na profilu raspoznaje kao minimalna vrijednosti amplituda.

5.2.2 Kosinus trenutne faze

Kosinus trenutne faze predstavlja kosinus kuta trenutne faze i matematički se izražava kao:

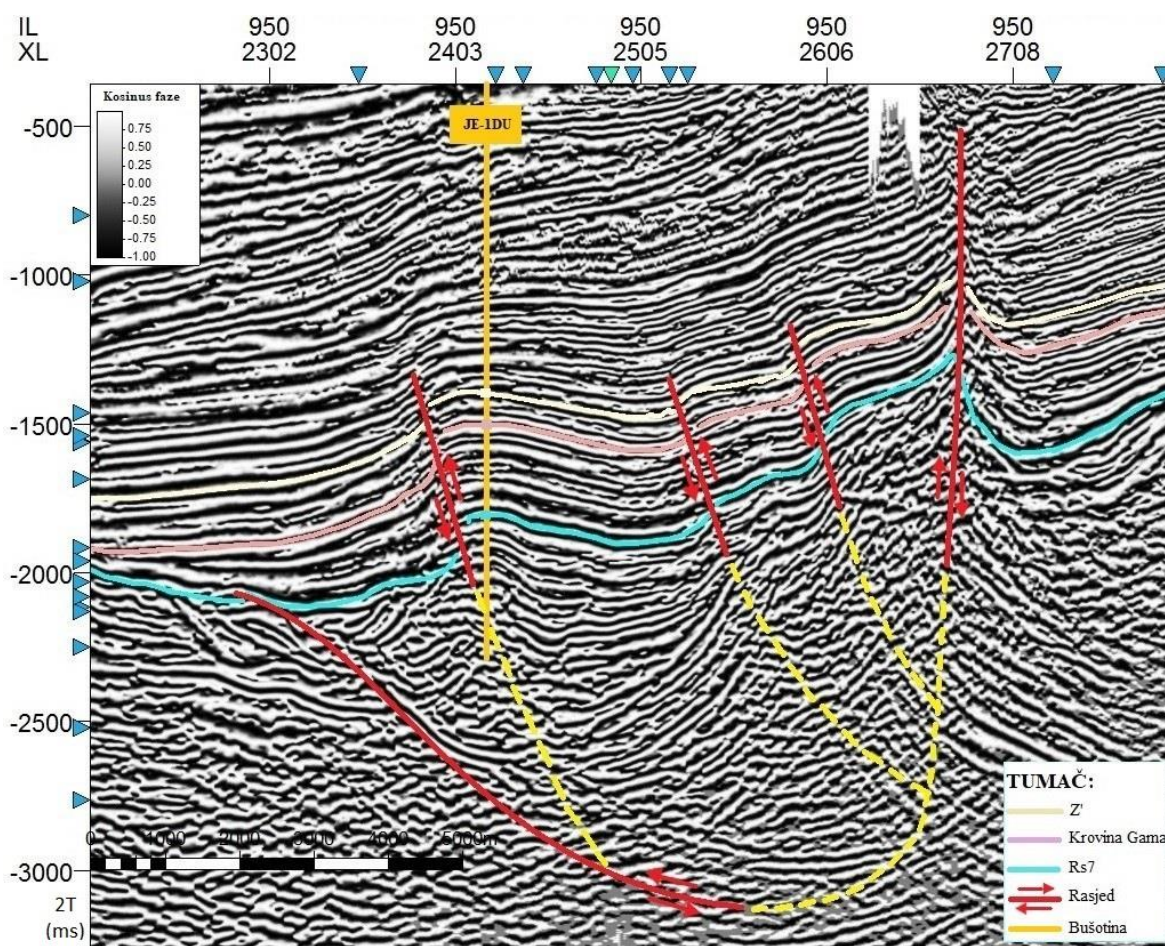
$$\cos \theta(t) = \frac{x(t)}{A(t)} \quad (5-7)$$

gdje je: $x(t)$ – pravi trag,

$A(t)$ – amplituda,

$\theta(t)$ – trenutna faza.

Funkcija kosinus trenutne faze rangira izlazne podatke u vrijednosti od -1.0 do 1.0 što znači da kosinus trenutne faze ne sadrži podatke o amplitudi. Ovaj postupak naglašava prikaz rubova kao što su rasjedi ili stratigrafske granice što ovaj atribut čini izvrsnim indikatorom lateralnih diskontinuiteta, stratigrafskih prekida i prekida facijesa. (SCHLUMBERGER, 2007).



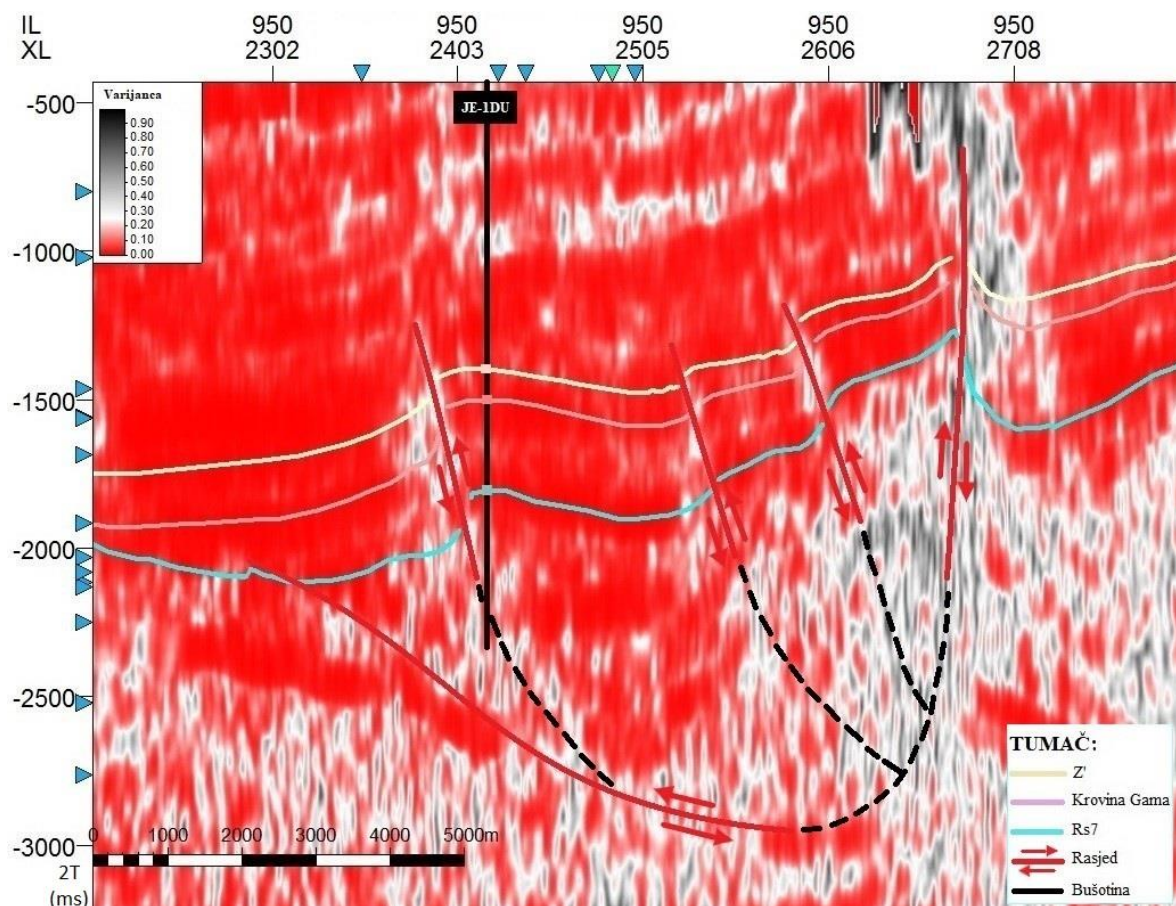
Slika 5.3 Poprečni profil T_{950} prikazan atributom kosinusa trenutne faze

Atribut kosinusa trenutne faze ukazuje na kontinuiranost interpretiranih horizonata, a osim toga znatno je olakšao i interpretaciju rasjeda (slika 5.3). Također se jasno vidi karakter rasjeda, odnosno pomak, te uzdizanje krovine i spuštanje podine čime je potvrđeno reversno rasjedanje.

5.2.3 Varijanca

Varijanca (eng. *Edge detection*) ili detekcija ruba je metoda koju su 2000. godine patentirali BEMMEL i ostali koja se koristi za izolaciju rubova, odnosno diskontinuiteta iz ulaznih podataka. Osim što je izvrstan atribut za otkrivanje diskontinuiteta uvelike se koristi i kao stratigrafski atribut pri detekciji taložnih značajki kao što su reljef i kanali (SCHLUMBERGER, 2007).

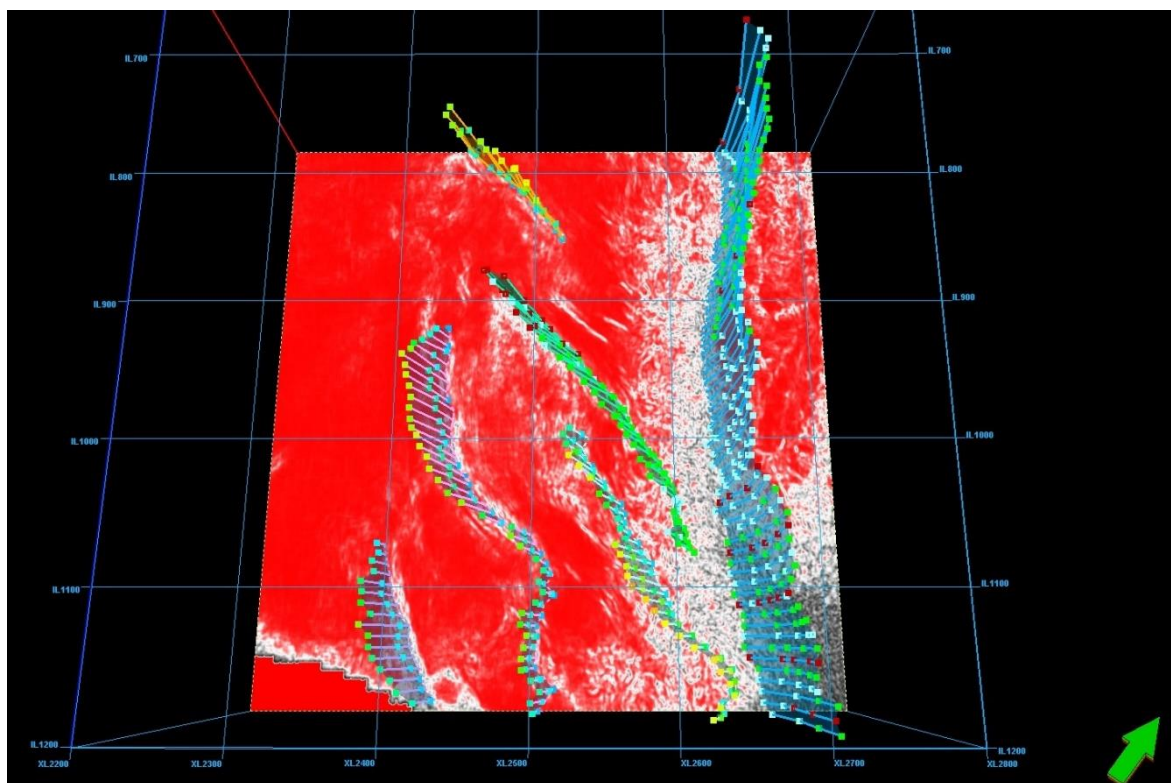
Postoje tri parametra koji kontroliraju atribut varijance. Prva dva su rasponi uzdužnih i poprečnih profila kako bi se uspješnije kontrolirao broj tragova koji su uključeni u izračun. Ovo prostorno odjeljivanje je posebno korisno kod interpretacije sustava rasjeda koji imaju određen pravac pružanja te se može postići oštrija slika. Treći parametar je okomito izgladivanje i pomaže u smanjivanju rezidualne horizontalne strukture i poboljšava kontinuiranost okomitih struktura. Za rasjede s manjim kutom nagiba taj parametar treba biti mali (20 – 40 ms), dok kod sustava rasjeda s većim kutom nagiba povećanje intervala okomitog izgladivanja rezultira izraženijim prikazom rubova, tj. diskontinuiteta (SCHLUMBERGER, 2007)



Slika 5.4 Poprečni profil T_{950} prikazan atributom varijance

Varijanca je jedan od atributa koji je najviše pomogao prilikom interpretacije rasjeda korištenjem vremenskog presjeka. Kao što se vidi na slici 5.4 klasična interpretacija na profilima prikazanim atributom varijance ističe diskontinuitete sivobijelom bojom, te se položaj rasjeda može otprilike procijeniti, no ne može se utvrditi s velikom preciznošću.

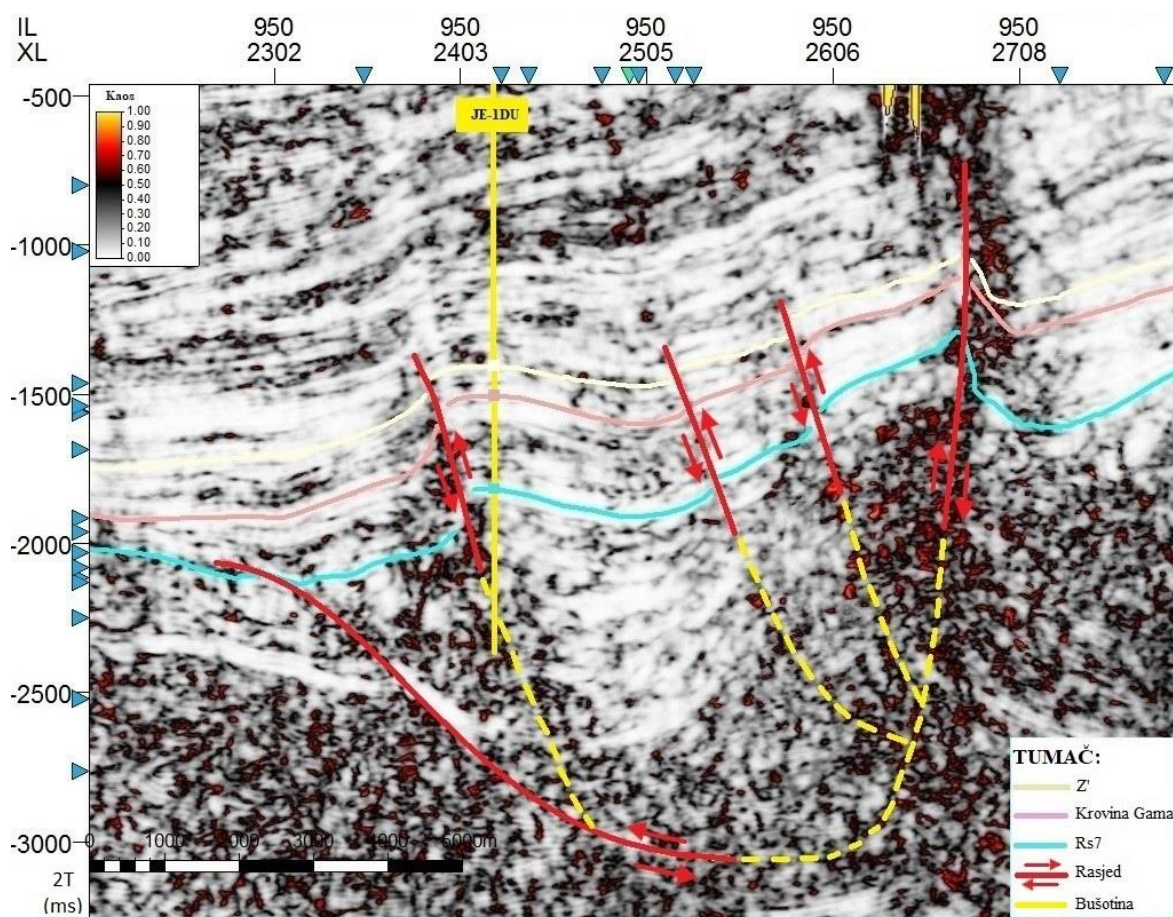
No, korištenje atributa varijance u vremenskom presjeku daje prikaz strukture iz nove perspektive, te se s lakoćom može utvrditi položaj rasjeda i njihovo prostiranje što je prikazano na slici 5.5. Vertikalan presjek rasjeda prikazuje cijeli seizmički volumen na kojem se mogu pratiti sustavi rasjeda. Osim toga, pomicanjem dubine dvostrukog vremena putovanja vala u 3D prikazu omogućuje se vertikalno praćenje rasjeda, čime se može procijeniti promjena nagiba rasjeda i njegova promjena oblika kroz dubinu.



Slika 5.5 Vremenski presjek atributa varijance za dvostruko vrijeme putovanja vala od 1684 ms

5.2.4 Kaos

Kaos je atribut koji spada u grupu stratigrafskih atributa i prikazuje „kaotičnost“ lokalnog seizmičkog signala unutar 3D-prozora. Područja kaotičnog signala povezuju se s lokalnim geološkim značajkama kao što su rasjedi, diskontinuiteti, grebenske strukture, ispune kanala itd. Za kaos je važno napomenuti da je neovisan o orijentaciji geoloških značajki i veličini amplituda što rezultira jednakim odzivom bilo da je riječ o velikim ili malim amplitudama i područjima sa ili bez nagiba (SCHLUMBERGER, 2007).



Slika 5.6 Poprečni profil T_{950} prikazan atributom kaosa

Na slici 5.6 može se primijetiti kako je atribut kaosa vrlo dobro istaknuo kaotičnost na profilu, posebice rasjede u obliku narančaste boje što je pomoglo prilikom interpretacije rasjeda.

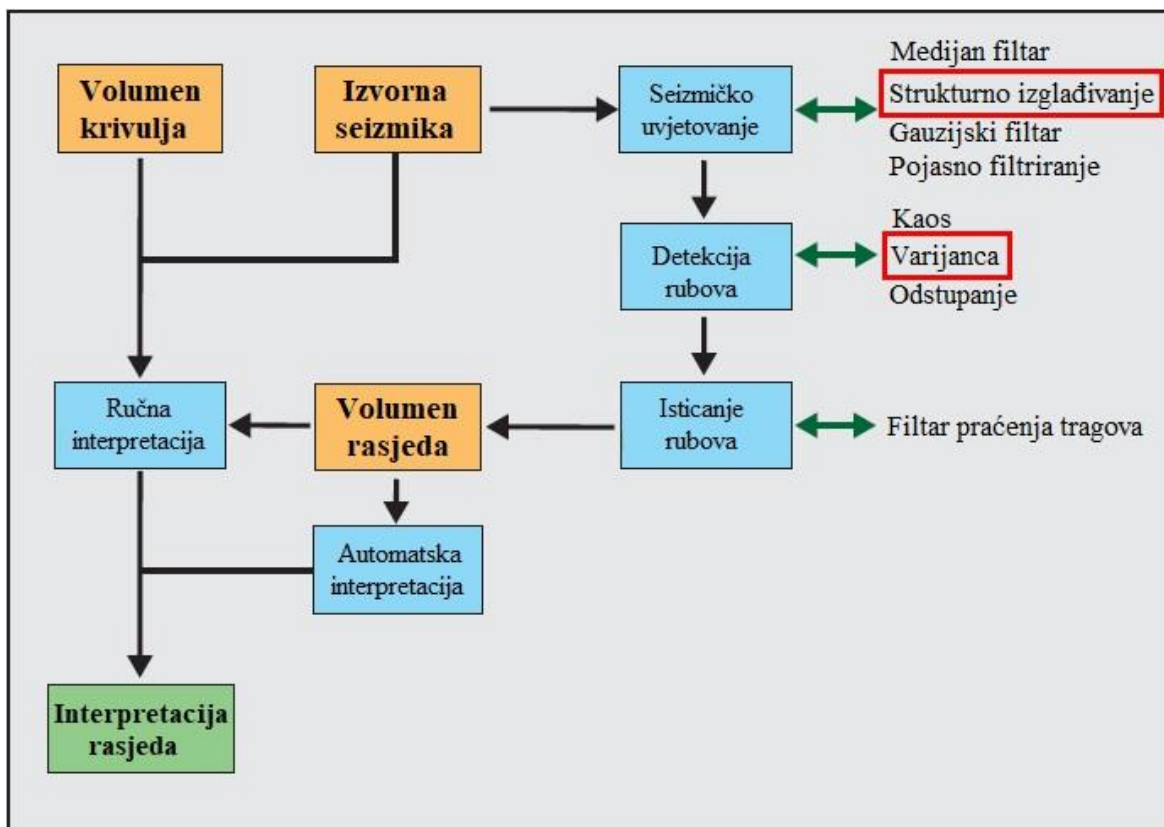
5.2.5 Atribut praćenja tragova

Atribut praćenja tragova (eng. *Ant-tracking*) je patentirana tehnologija geofizičke tvrtke Schlumberger koja pospješuje praćenje diskontinuiteta kao što su rasjedi, pukotine i ostale linearne anomalije unutar seizmičkog volumena podataka (PEDERSEN et al., 2002). Prije primjene atributa praćenja tragova podaci se moraju pripremiti izračunavajući strukturne attribute kao što je npr. varijanca, koji će poboljšati kvalitetu podataka, odnosno istaknuti diskontinuitete.

Tijek izračuna atributa praćenja tragova (eng. Ant-tracking workflow)

Algoritam ovog atributa temelji se na principu rada „mravlje kolonije“ kako bi se prepoznali trendovi šumova. Intelligentni agenti, koji se nazivaju „mravi“, prate i izvlače rubove u strukturnim atributima kao što su varijanca ili kaos. Ovaj pristup ističe rubove na volumenima strukturnih atributa jer ističe samo kontinuirane značajke koje su najvjerojatnije rasjedi. Ostale značajke kao što su šumovi imaju unutarnju kaotičnu strukturu koja nije kontinuirana pa je malo vjerojatno da će je algoritam atributa praćenja tragova detektirati. „Mravi - tragači“ koriste princip inteligencije kolonije mrava koja opisuje kolektivno ponašanje grupe socijalnih insekata; npr. kako mravi komunicirajući putem kemijskih supstanci pronalaze najmanju udaljenost između gnijezda i hrane (SCHLUMBERGER, 2007).

Tijek izračuna ili (izrade) atributa praćenja tragova sastoji se od 4 glavne aktivnosti: 1) seizmičko uvjetovanje; 2) detekcija rubova; 3) isticanje rubova i 4) primjena filtera praćenja tragova što je prikazano na slici 5.7 . Seizmičko uvjetovanje poboljšava omjer signal-šum i daje volumen podataka s poboljšanom detekcijom rubova. Drugi korak, detekcija rubova, podrazumijeva korištenje jedne od dostupnih metoda strukturnih atributa kako bi se istaknuli prostorni atributi u seizmičkim podacima. U ovom radu korištena je varijanca jer je kaos previše isticao kaotičnu strukturu unutar seizmičkih podataka što je smanjilo kvalitetu rezultata. Treći korak je isticanje rubova. Kreira se volumen koji značajno poboljšava strukturne attribute suzbijajući šumove i ostale značajke, a koji nisu rasjedi. Četvrti korak, uključuje primjenu filtera praćenja tragova (engl. *Ant-track volume*) kojim se dovršava tijek atributa praćenja tragova. Nakon toga slijedi interpretacija koja uključuje tradicionalnu 3D seizmičku interpretaciju rasjeda ručnom ili automatskom metodom praćenja rasjeda. U ovom radu korištena je kombinacija ručne i automatske metode praćenja rasjeda (SCHLUMBERGER, 2007).



Slika 5.7 Shema tijeka izračuna atributa praćenja tragova (eng. Ant-tracking workflow)

1) Seizmičko uvjetovanje

Seizmičko uvjetovanje izvedeno je koristeći strukturno izgladivanje koje eliminira šumove i poboljšava prostornu kontinuiranost pri čemu ne izgladjuje značajne diskontinuitete u volumenu.

2) Detekcija rubova

Za razliku od strukturnog izgladivanja koje ne utječe na diskontinuitete, metode detekcije rubova su ovisne od strukturi i ulaznim podacima pa prilikom izvođenja ovog koraka treba paziti da se ne eliminiraju diskontinuiteti u podacima koji predstavljaju stvarnu strukturu. Pri tome se najčešće koriste atributi varijance i kaosa. Kao ulazni podatak koristi se volumen dobiven seizmičkim uvjetovanjem u prvom koraku korištenjem strukturnog izgladivanja na koji se zatim primjenjuje atribut varijance ili kaosa.

3) Isticanje rubova

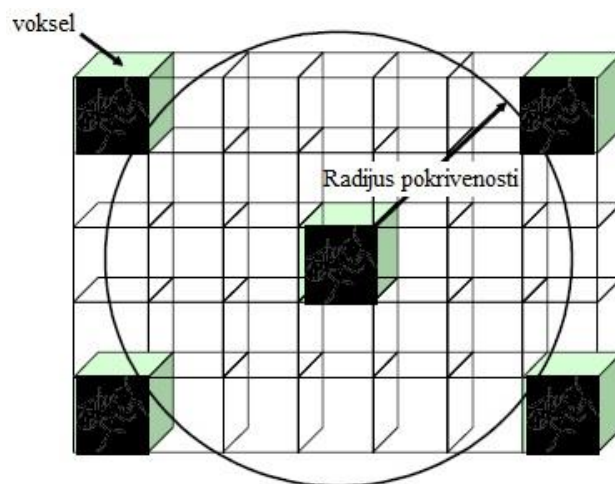
Isticanje rubova izvodi se na volumenu podataka dobivenom u prethodna dva koraka, korištenjem prvo strukturnog izgladivanja, a zatim izračunavanjem atributa varijance. Na ovako dobivenom kombiniranom volumenu podataka se zatim ponovno provodi strukturno izgladivanje, no ovaj put bez korištenja dodatnih opcija koje uključuju orijentaciju nagiba i isticanje rubova. Time se postiže primjena 3D Gausovog izgladivanja podataka što poboljšava prostornu kontinuiranost i smanjuje preostali šum. 3D Gaussovo izgladivanje podrazumijeva primjenu Gaussovog filtra za svaki smjer u koordinatnom sustavu (x, y, z) zasebno čime se dobiva gradijent.

4) Primjena filtera za praćenje tragova

Filter za praćenje tragova je vrlo osjetljiv na kvalitetu podataka i geološke značajke. Atribut praćenja tragova pruža niz parametara koje je važno ispravno postaviti sukladno s ulaznim podacima kako bi nakon obrade dobili što bolju kvalitetu podataka. Pri tome se mogu koristiti dvije grupe parametara, ovisno o podacima, tzv. *pasivni ili agresivni „mravi“*.

Parametri „pasivnih mrava“ koriste se kada su strukturne značajke jako izražene, dok „agresivni mravi“ služe za isticanje detalja, manjih rasjeda i pukotina. U ovom radu korištena je opcija pasivnih „mrava“ s obzirom da je cilj bio istaknuti veće sustave rasjeda.

Parametrom *početna granica „mrava“* određuje se distribucija „mrava“, definira se njihov broj i određuje se radijus unutar kojega će svaki pojedini „mrav“ tražiti nepravilnosti, odnosno rubove (slika 5.8). Jednom postavljen parametar određuje koliki radijus pokriva svaki „mrav“ u jedinicama vokselu unutar kojeg drugi „mravi“ nemaju pristup. Radijus od 3 vokselu je minimum i služi za detaljniju pokrivenost malih rasjeda i pukotina, dok se pri radijusu od 15 vokselu najčešće počinju gubiti značajke strukture. S obzirom da je u ovom radu potrebno istaknuti veće sustave rasjeda, korišten je radijus od 11 vokselu. Kao prvi korak u algoritmu praćenja tragova, svaki „mrav“ čini početnu procjenu orijentacije za lokalni maksimum unutar zadanog područja.



Slika 5.8 Prikaz radijusa pokrivenosti u voksela, koji ovdje iznosi 3 (SCHLUMBERGER, 2007).

Parametar ***devijacija praćenja tragova*** definira granicu odstupanja od početnih postavki. Parametar je definiran brojem voksela u sva tri smjera u prostoru i to je maksimalno dopušteno odstupanje svakog „mrava“ od lokalnog maksimuma kojeg prati. Metoda općenito omogućuje „mravu“ prihvatanje lokalnog maksimuma od jednog voksela s obje strane predviđenog položaja. Ako je maksimum izvan ovog koraka uzima se u obzir parametar devijacije praćenja tragova. Na primjer, vrijednost od jedan bi omogućila odstupanje po jedan voksel u bilo kojem smjeru pri traženju lokalnog maksimuma. Ako se maksimum ne pronađe, taj je korak zabilježen kao ilegalni korak. U ovom radu, devijacija praćenja tragova postavljena je na 3 voksela.

Veličina koraka definira broj voksela unutar pojedinog koraka pretraživanja. Povećanje ove vrijednosti omogućuje „mravu“ da dalje traži na većim udaljenostima, ali smanjuje razlučivost rezultata. U ovom radu veličina koraka agenta postavljena je na 4 voksela.

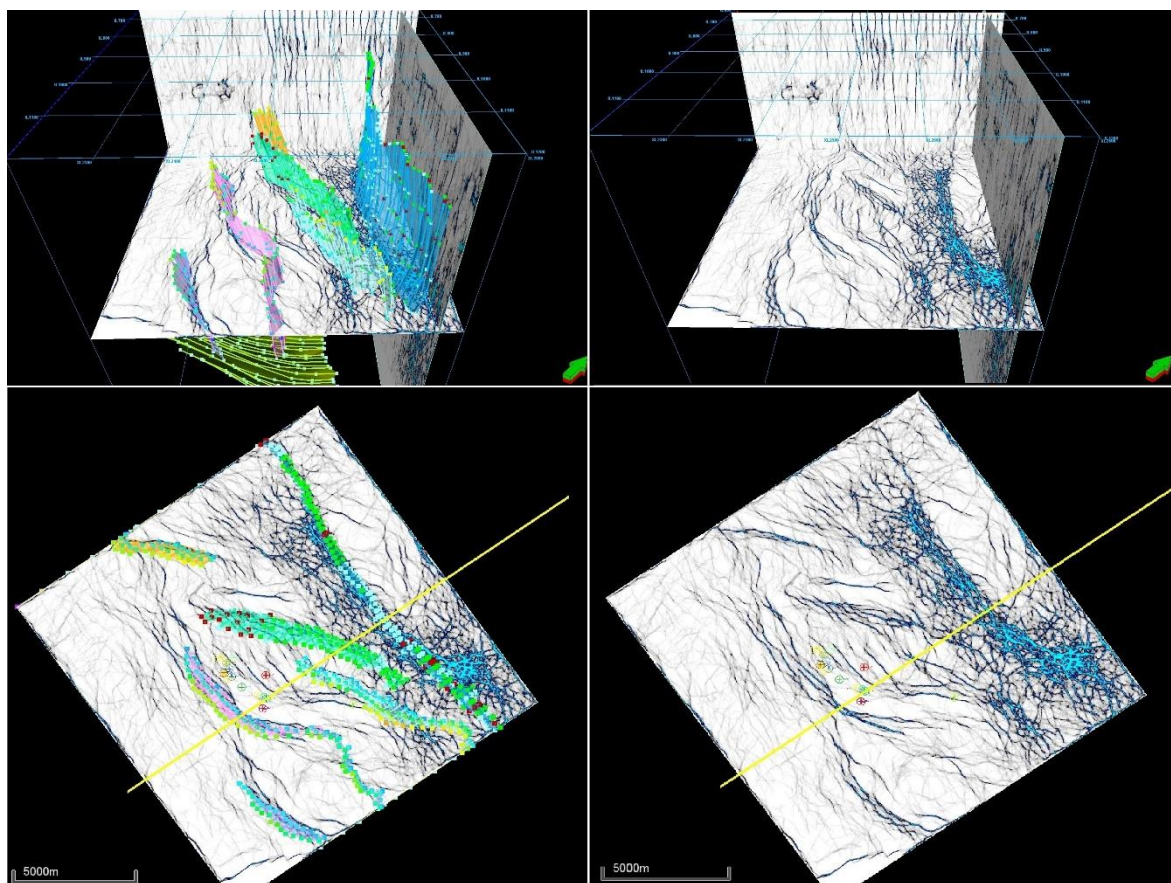
Dozvoljeni broj ilegalnih koraka definira koliko koraka „mrav“ može nastaviti u slučaju da nije pronađena prihvatljiva vrijednost ruba (lokalni maksimum) i u ovom radu postavljen je na 3 koraka.

Broj potrebnih legalnih koraka definira broj koraka koji moraju sadržavati valjanu vrijednost ruba (diskontinuiteta), nakon ilegalnog koraka, kako bi se nastavilo traganje. Time se razlikuje otkriveni rub od neorijentiranog šuma. U ovom radu ovaj parametar je postavljen na 3 koraka.

Dopušteni ilegalni i potrebni legalni koraci koriste se u kombinaciji jedni s drugima. Na primjer, ako je broj dopuštenih ilegalnih koraka postavljen na 1, moguć je samo jedan korak bez pronalaženja lokalnog maksimuma. Isto tako, kako „mrav“ napreduje i otkriva valjani rub, to znači jedan legalan korak. Ako napreduje i pronađe drugi valjani rub, to se smatra drugim legalnim korakom. Ako je broj potrebnih legalnih koraka postavljen na 2, trag se smatra legalnim i zabilježenim. Ako je parametar podešen na 3, a u sljedećem koraku nije pronađen rub, ovaj se trag neće smatrati legalnim i neće biti zabilježen. Nelegalni koraci se računaju samo nakon bilježenja legalnih koraka.

Postotak nelegalnih koraka koji su dozvoljeni tijekom cijele putanje jednog „mrava“ određeni su parametrom **kriterija zaustavljanja**. Kada zbroj ilegalnih koraka u odnosu na legalne korake postane prevelik unutar područja pretraživanja putanja se prekida.. Ovaj parametar izražava se u postocima pretraženih vokseli. U ovom radu postavljen je na 10%.

Polarni dijagram (eng. *stereonet*) je grafički modul pomoću kojeg se ograničava azimut i smjer pružanja rasjeda koji će biti dopušteni agentima za pretraživanje. Ovaj parametar omogućuje korisniku da filtrira neželjene rezultate, odnosno kutove jednake po iznosu ali suprotne orijentacije. S obzirom da se na polju Ježevo sjeverozapadna antiklinala pruža u smjeru sjeverozapad-jugoistok, a antiklinala na jugoistočnom dijelu polja u smjeru istok-zapad stereonet nije korišten, već je ostavljena mogućnost traganja bez ograničavanja azimuta i smjera pružanja.



Slika 5.9 3D i 2D vremenski presjek atributa praćenja tragova za dvostruko vrijeme putovanja vala od 1684 ms

Atribut praćenja tragova se uz atribut varijance pokazao najkorisnijim za interpretaciju rasjeda. Na slici 5.9 prikazan je atribut praćenja tragova u 3D i 2D-vremenskom presjeku za dvostruko vrijeme putovanja vala od 1684 ms. Glavni sustavi rasjeda su jasno uočljivi i prikazani su svijetloplavom bojom. Osim toga, može se primijetiti niz sitnih rasjeda i pukotina kao posljedica djelovanja sile kompresije na polju Ježevo. Prilikom izrade ovog atributa isprobane su razne kombinacije parametara dok se nije dobio zadovoljavajući prikaz sa vrijednostima parametara navedenim prilikom njihova opisa. Atribut praćenja tragova se većinom koristio na vremenskom prikazu s obzirom da njegova upotreba na profilima nije polučila dobrim rezultatima. Ovaj atribut poslužio je kao dodatna provjera atributa varijance, te je kombinacijom korištenja ova dva atributa dobivena preciznija interpretacija sustava rasjeda.

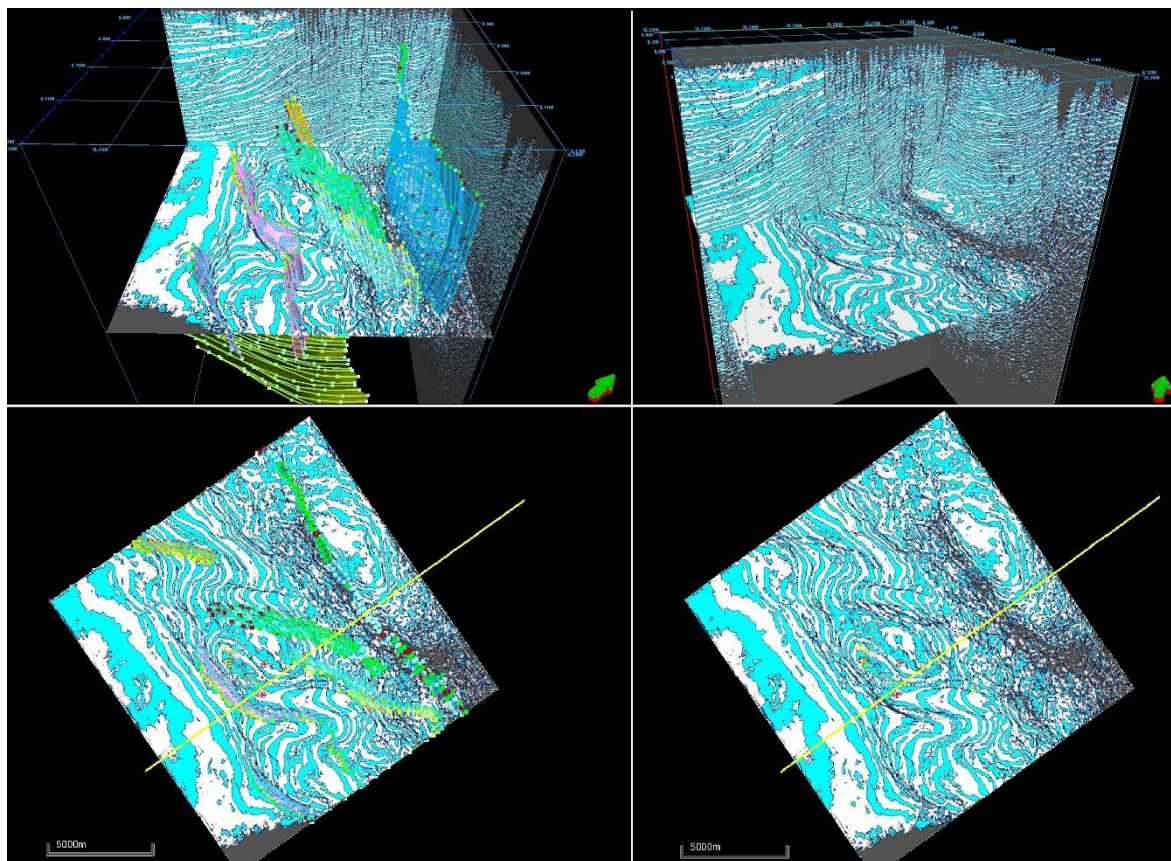
5.2.6 Seizmički kalkulator

Seizmički kalkulator je koristan alat pomoću kojeg se mogu izračunati nove verzije 3D seizmičkih podataka, bilo putem unaprijed definiranih standardnih funkcija ili formula definiranih od strane samog korisnika. Kalkulator se koristi za izradu izračunatih virtualnih seizmičkih volumena na temelju već postojeće seizmičke kocke ili između dvije ili više postojećih seizmičkih kocki. Temeljni podatak je pojedini seizmički trag i ne uzimaju se u obzir susjedni tragovi. Prilikom izvođenja jednadžbe izrađuje se virtualni volumen s rezolucijom jednakom ulaznim podacima (SCHLUMBERGER, 2007).

U ovom radu, koristeći seizmički kalkulator izrađen je novi seizmički volumen (seizmička kocka) kombinirajući podatke dobivene atributom praćenja tragova i početne seizmičke podatke s ciljem dobivanja volumena podataka u kojem bi rasjedi određeni atributom praćenja tragova bili naglašeni. Korištena je formula:

$$\text{Kombinirani volumen} = \text{Ako}(\text{Atribut_Praćenja_Tragova} \geq \text{Prag}, U, \text{Izvorna_Seizmika})$$

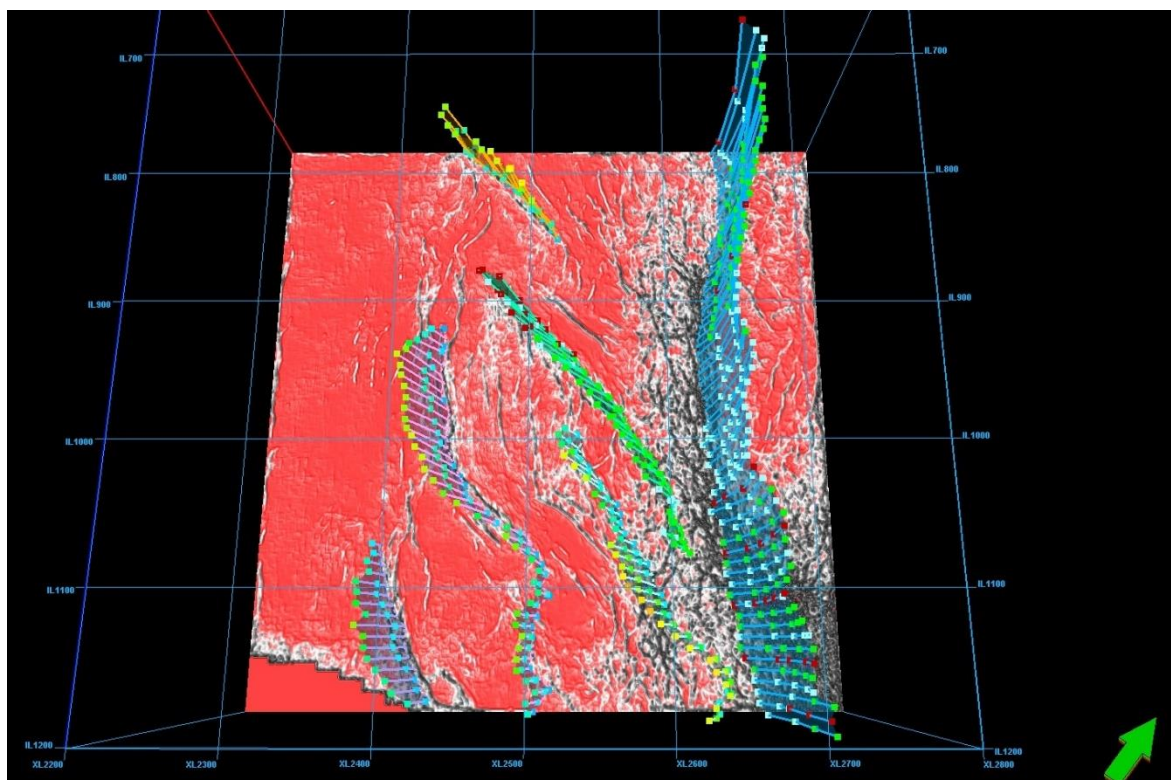
gdje „prag“ predstavlja željenu vrijednost koja će biti označena kao rasjed. Ovdje je kao prag korištena vrijednost 0.5 koja poprilično dobro naglašava velike rasjede.



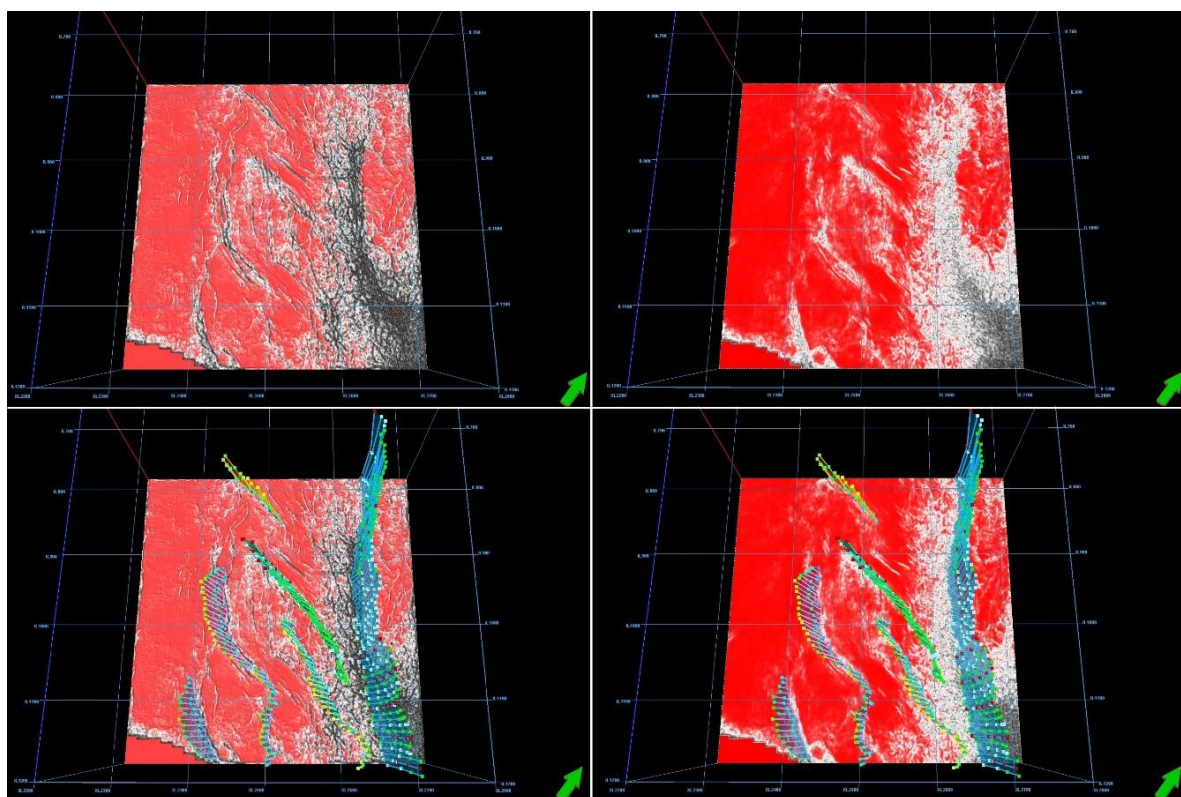
Slika 5.10 3D i 2D vremenski presjek izrađenog kombiniranog volumena za dvostruko vrijeme putovanja vala od 1684 ms

Na slici 5.10 prikazan je kombinirani volumen za dvostruko vrijeme putovanja vala od 1684 ms. Područja sive boje ukazuju na rasjede, a osim rasjeda je dosta dobro prikazano i boranje što je prednost u odnosu na atribut praćenja tragova na kojem boranje nije uočljivo. Međutim, rasjedi su puno uočljiviji i bolje prikazani na atributu praćenja tragova, te se može zaključiti kako ovaj izrađeni atribut nije polučio željeni rezultat, i nije uvelike olakšao interpretaciju rasjeda kao atribut praćenja tragova i varijanca.

Ova formula iskušala se i na drugim atributima, ali se kao ulazni volumen umjesto atributa praćenja tragova koristio volumen atributa varijance i kaosa čime su se dobili prilično zanimljivi rezultati. Prilikom korištenja varijance dobiven je volumen s izraženijim rasjedima (slike 5.11, 5.12 i 5.13) od volumena koji je dobiven klasičnom izradom atributa varijance (slike 5.4 i 5.5). Kod izrade kaosa također je dobiven volumen s poboljšanim prikazom rasjeda i kaotičnosti signala (slika 5.13).

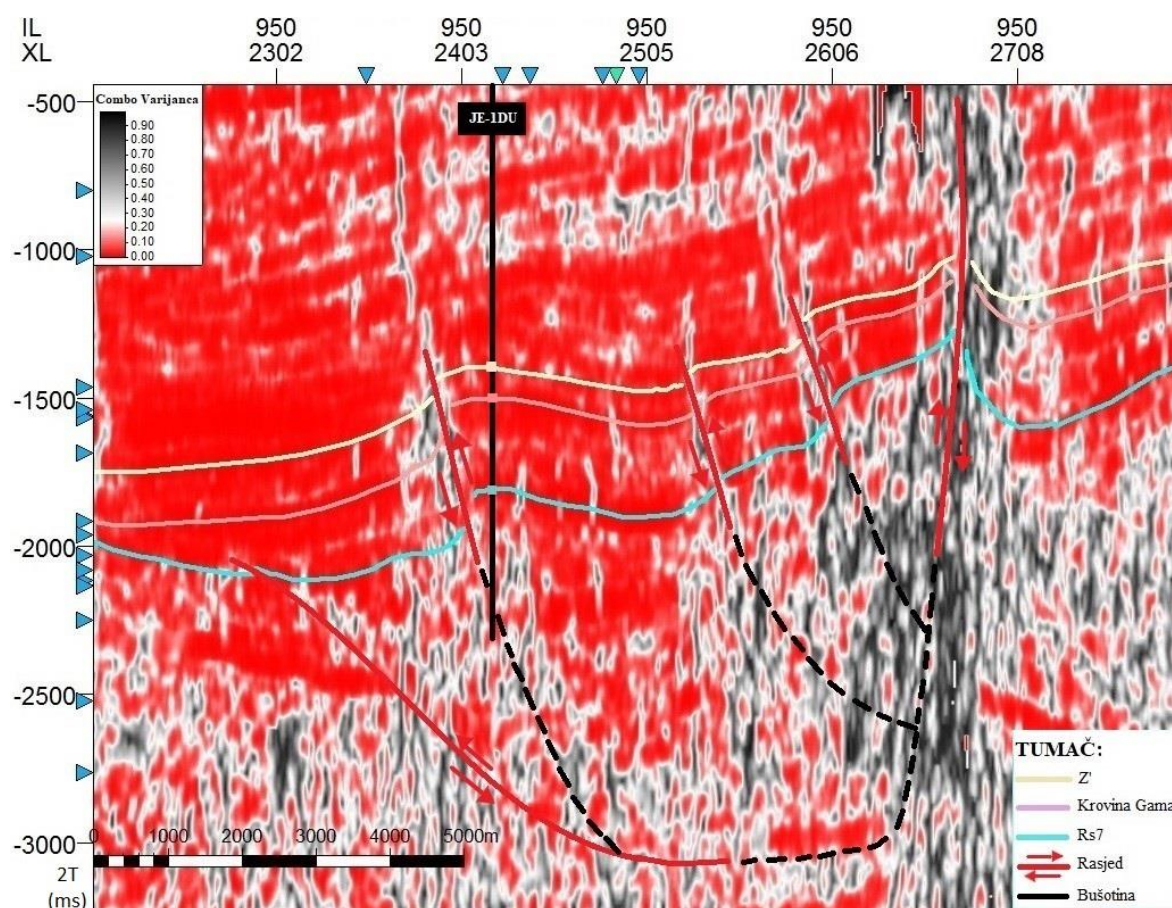


Slika 5.11 Vremenski presjek izrađenog kombiniranog volumena atributa varijance za dvostruko vrijeme putovanja vala od 1684 ms



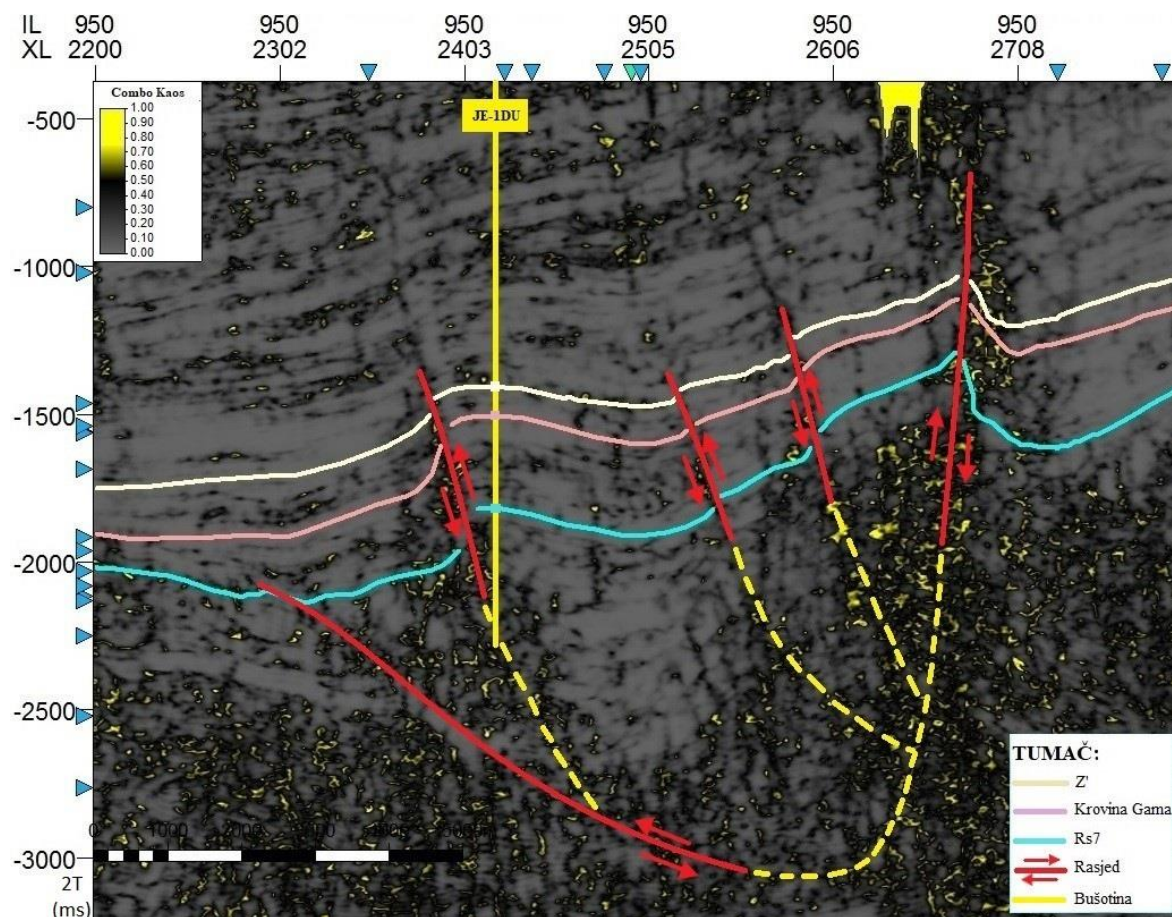
Slika 5.12 Vremenski presjek izrađenog kombiniranog volumena atributa varijance i klasičnog atributa varijance za dvostruko vrijeme putovanja vala od 1684 ms

Na slici 5.12 sa lijeve strane su prikazani vremenski presjeci izrađenog kombiniranog volumena atributa varijance za dvostruko vrijeme putovanja vala od 1684 ms bez rasjeda i sa interpretiranim rasjedima dok su sa desne strane prikazani vremenskih presjeci uobičajenog atributa varijance bez rasjeda i sa interpretiranim rasjedima za isto dvostruko vrijeme od 1684 ms kako bi njihova usporedba bila što vjerodostojnija. Odmah na prvi pogled može se uočiti kako izrađeni atribut varijance pruža oštrije i precizniji prikaz sustava rasjeda od klasičnog atributa varijance. To je ponajviše zbog razlike u boji prikaza rasjeda, kod izrađenog atributa varijance boja je znatno tamnija. Osim toga, izrađeni atribut varijance sadrži izraženu teksturu koja dodatno naglašava sustave rasjeda. U usporedbi s izrađenim atributom varijance, linije sustava rasjeda na klasičnom atributu varijance su puno svjetlije i njihovi prekidi i promjena smjera nisu jasno uočljivi. Zbog toga se prilikom interpretacije rasjeda koristio izrađeni kombinirani atribut varijance umjesto klasičnog.



Slika 5.13 Poprečni profil T_{950} prikazan izrađenim kombiniranim volumenom atributa varijance

Na slici 5.13 vidi se poprečni profil T_{950} prikazan izrađenim kombiniranim volumenom atributa varijance. Kao i na prethodnom vremenskom presjeku, i na ovom profilu se može uočiti da su rasjedi puno izraženiji i jasnije prikazani nego na slici 5.4. koja prikazuje isti profil sa klasičnim atributom varijance.



Slika 5.14 Poprečni profil T_{950} prikazan izrađenim kombiniranim volumenom atributa kaosa

Na slici 5.14 je poprečni profil T_{950} prikazan izrađenim kombiniranim volumenom atributa kaosa. Usporedbom ovog prikaza sa prikazom klasičnog atributa kaosa na slici 5.6 može se uočiti kako su na slici 5.14 podjednako dobro prikazani veliki rasjedi, a uz to se poboljšala i uočljivost manjih rasjeda, što je najvjerojatnije rezultat razlike u bojama. Na slici 5.14 diskontinuiteti su prikazani žutom bojom, a okolno područje smanjene kaotičnosti je prikazano kao tamnosivo što stvara vrlo dobar kontrast i automatski pojačava istaknutost prikaza diskontinuiteta. Stoga, može se zaključiti da izrađeni kombinirani volumen atributa kaosa u odnosu na klasični atribut kaosa pruža bolji prikaz kaotičnosti odabranog područja i jače ističe diskontinuitete.

6 ZAKLJUČAK

Cilj ovog diplomskog rada bio je primijeniti metodu analize seizmičkih atributa na već postojeće trodimenzionalne seizmičke podatke u programskom paketu Petrel™ 2014 i interpretirati krovinu Gama serije pješčenjaka i elektrokarotažne markere Z' i Rs7, te sustave rasjeda polja Ježevo koji tvore pozitivnu cvjetnu strukturu.

Prije same interpretacije izračunat je sintetski seizmogram za bušotinu JE-1DU pomoću Rickerovog valića. Time se preciznije utvrdio položaj horizonata na površinskim seizmičkim podacima. Prilikom interpretacije korišteni su prostorni seizmički atributi koji su omogućili nove prikaze podataka, te time znatno olakšali interpretaciju.

Korišteni su atributi trenutne amplitude, kosinus trenutne faze, kaos i varijanca. Prilikom interpretacije seizmičkih horizonata najkorisnijima su se pokazali atributi trenutna amplituda i kosinus trenutne faze jer su jasno ukazivali na lateralne diskontinuitete na seizmičkim profilima. Za interpretaciju rasjeda ponajviše se koristio atribut praćenja tragova koji zahtijeva pomnu i složenu obradu ulaznih podataka i odabir parametara prilikom njegovog izračunavanja. Taj atribut ponudio je iznimno dobar prikaz sustava rasjeda u 3D i 2D vremenskom presjeku i uvelike je olakšao interpretaciju rasjeda. Osim toga, izrađen je i kombinirani virtualni seizmički volumen uz pomoć seizmičkog kalkulatora. Cilj je bio poboljšati isticanje rasjeda na atributu praćenja tragova, no nije polučio zadovoljavajućim rezultatima. Međutim, ista formula iskušala se na drugim atributima, te se kao ulazni volumen umjesto atributa praćenja tragova koristio volumen atributa varijance i kaosa čime su se dobili prilično interesantni prikazi. Izrađeni kombinirani volumen atributa varijance dao je puno jasniji prikaz sustava rasjeda od klasičnog atributa varijance što je analizirano na vremenskom presjeku dvostrukog putovanja vala od 1684 ms. Na izrađenom kombiniranom volumenu sustavi rasjeda i njihov smjer pružanja su puno jasniji. Kombinirani volumen atributa varijance se dakle, uz atribut praćenja tragova, pokazao najučinkovitijim atributom prilikom interpretacije rasjeda. Izrađeni kombinirani volumen atributa kaosa također je dao poboljšani prikaz podataka. Analiziran je na poprečnom profilu T_{950} gdje se može uočiti pojačani kontrast između kaotičnih i nekaotičnih podataka, čime diskontinuiteti na profilu postaju uočljiviji nego na klasičnom prikazu atributa kaosa. Korištenje atributa praćenja tragova i seizmičkog kalkulatora dalo je nove i zanimljive prikaze podataka na polju Ježevo, te bi mogli poslužiti kao vrlo korisne metode prilikom budućih interpretacija podataka.

LITERATURA

- BARIŠIĆ, M. (1985). O strukturnim odnosima naftnog polja Ježevo i predjela Duga Greda-Posavski Bregi (Savska Potolina). *NAFTA* 36, 5-14.
- BEMMEL, P., PEPPER, R.E.F. (2000). Seismic signal processing method and apparatus for generating a cube of variance values . U.S.: Patent Number 6,151,555.
- DREW, L. J. (2003). *Low-sulfide quartz gold deposit model*. Preuzeto 9. Kolovoz 2018 iz [www.usgs.gov](https://pubs.usgs.gov/of/2003/of03-077/of03-077.pdf): <https://pubs.usgs.gov/of/2003/of03-077/of03-077.pdf>
- DUREKOVIĆ, M. (1995). Taloženje i rezervoarska obilježja Iva-pješčenjaka na naftnom polju Ivanić. U *Magistarski rad* (str. 59 str.). Zagreb: Sveučilište u Zagrebu.
- GARDNER, G.H.F., GARDNER, L.W. & GREGORY, A.R. (1974). Formation velocity and density- The diagnostic basics for stratigraphic traps. *Geophysics*, 39, 770-780.
- Google Earth*. (2018, Kolovoz). Retrieved from [www.google.com/earth/](https://earth.google.com/web/@45.76742662,17.26604203,386.97557428a,260997.81245939d,35y,1.03305415h,0t,0r): <https://earth.google.com/web/@45.76742662,17.26604203,386.97557428a,260997.81245939d,35y,1.03305415h,0t,0r>
- KOVAČEVIĆ, A. (1996). Iva-pješčenjaci na naftnom polju Ježevo. U *Diplomski rad* (str. 35 str.). Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet.
- KOVAČIĆ, N., ŽILAJKOVIĆ S. (2001). *Izveštaj o obradi projekta 3D Sava-I*. Zagreb: INA Naftaplin, 1-12.
- LARVA, O. (1996). Iva-pješčenjaci na naftno-plinskom polju Voloder. U *Diplomski rad* (str. 39 str.). Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet.
- LINARIĆ, P; GOIĆ, M., KARAČIĆ, D., BJELIĆ, V., HERCEG, S., KREŠO-LOVRIĆ, M., GOIĆ, M., GAZDAG J., ČORAK, V., PERIĆ, M., BIJAC, R. (1986.). *Elaborat o rezervama nafte i plina naftno-plinskog polja "Ježevo"*. Zagreb: Fond stručne dokumentacije INA-Naftaplina.
- MAJER, Đ., DUREKOVIĆ, M., HINIĆ, A., DOMITROVIĆ, D., ŠKRNJUG, M., LUKIĆ, Ž. (2006). *Elaborat o rezervama ugljikovodika eksploatacijskog polja Ježevo*. Zagreb: Fond stručne dokumentacije INA-Naftaplina.
- MALVIĆ, T., SAFTIĆ, B. (2008). *Dubinsko kartiranje*. Zagreb: Fakultetska skripta, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet.
- MATASOVIĆ, M. (1996). Petrološke i sedimentološke značajke pješčanih tijela- ležišta "C" naftno-plinskog polja Mramor Brdo. U *Diplomski rad* (str. 33 str.). Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet.
- OREŠKOVIĆ, J. (2006). *Procjena ležišnih značajki korištenjem seizmičkih atributa i seizmičkog modeliranja na primjeru polja Stari Gradac*. Zagreb: Magistarski rad, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet.
- PEDERSEN, S.I., RANDEN, T., SONNENLAND, L., STEEN, O. (2002). Automatic fault extraction using artificial ants. *72nd SEG International Conference*. Salt Lake City.

- RÖGL, F. (1996). Stratigraphic correlation of the Paratethys Oligocene and Miocene. *Mitteilungen Ges. Geol. Bergbaustudenten Österreich*, 41, (str. 65-73, 1 tab). Wien.
- RÖGL, F. (1998). Palaeographic consideration for Mediterranean and Paratethys seaways (Oligocene to Miocene). *Ann. Naturhist. Mus. Wien*, 99A, (str. 279-310). Wien.
- ROYDEN, L. H. (1988). Late Cenozoic Tectonics of the Pannonian Basin System. *AAPG Memoir 45 (Chap. 3) - The Pannonian Basin* (eds. Royden, L., H. & Horváth, F.), p. 27-48, AAPG.
- SCHLUMBERGER. (2007). *Interpreter's guide to seismic attributes*.
- SHERIFF, R. (1978). *A first course in geophysical exploration and interpretation*. Boston: International Human Resources Development Corporation.
- ŠUMANOVAC, F. (2007). *Geofizička istraživanja podzemnih voda*. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet.
- ŠUMANOVAC, F. (2012). *Osnove geofizičkih istraživanja*. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet.
- TANER, M. T., KOEHLER, F., SHERIFF, R. E. (1979). Complex seismic trace analysis. *Geophysics*,.
- TANER, M., T., SCHUELKE, J., S., O'DOHERTY, R. & BAYSAL, E. (1994). Seismic attributes revisited. *64th Annual International Meeting* (pp. 1104-1106). Society of Exploration Geophysics, Expanded Abstracts.
- VELIĆ, J. (1980). *Geološka građa zapadnog dijela Savske depresije*. Zagreb: Disertacija, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet.
- VELIĆ, J. (2007). *Geologija ležišta nafte i plina*. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet.